

DOI: 10.17122/ntj-oil-2018-4-67-72  
УДК 622.692.4

А.И. Сайфутдинов, Г.Е. Коробков (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация)

## РОБАСТНОСТЬ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ НЕФТЕПРОВОДОВ

Askar I. Saifutdinov, Gennadiy E. Korobkov (Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation)

### ROBUST MATHEMATICAL MODELS FOR DURABILITY ESTIMATION OF UNDERWATER OIL PIPELINES

#### Введение

В нефтепроводном транспорте используется парадигма управления техническим состоянием элементов системы на основании прогноза процессов износа. Формируется прогноз технического состояния объекта (время безопасной эксплуатации элемента системы), разрабатывается план работ по совершенствованию технического состояния обследованного объекта, и по истечении срока безопасной эксплуатации производятся ремонтно-восстановительные работы. Прогнозирование технического состояния базируется на применении математических моделей, использующих банк данных информационно-аналитических систем. Устойчивость системы математической обработки данных предполагает минимальную погрешность решения и не допускает чрезмерного влияния погрешности исходных данных на расчетный результат.

#### Цели и задачи

Исследовать робастность применяемой математической модели циклической долговечности трубопроводного элемента, провести анализ погрешности исходной информации в процессе применения модели.

#### Результаты

Разработана методика анализа робастности математической модели последствий малоциклового усталости подводных переходов на основе учета погрешности входящих в модель величин.

#### Background

At oil pipeline transport, the paradigm of managing the system elements technical state is used based on the wear processes forecast. Facility technical condition forecast (the time of system element safe operation) is formed, a plan of work is developed to improve the surveyed object technical condition, and after safe operation period repair and recovery operations are performed. The technical condition forecasting is based on the mathematical models that use information-analytical systems database. The mathematical data robust processing system assumes a minimum error in the solution and does not allow excessive initial data error influence on the calculated result.

#### Aims and Objectives

To investigate the robustness of the applied mathematical model of the pipeline element cyclic durability, to analyze the initial information error in the applying the model.

#### Results

A method of analysis of the robustness of the mathematical model of the consequences of low-cycle fatigue of underwater transitions based on the error of the model values is developed.

**Ключевые слова:** подводный переход, нефтепровод, математическая модель, робастность, цикл, усталость, погрешность, долговечность, трещина, дефект

**Key words:** underwater pipeline, oil pipeline, mathematical model, robustness, cycle, fatigue, error, durability, crack, defect

ПАО «Транснефть» эксплуатирует около 80 тыс. км магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов, включающих примерно 1500 подводных переходов, общая длина которых между секущими задвижками составляет около 3 тыс. км.

Самые сложные в эксплуатации - глубоководные подводные переходы, расстояние от верхней образующей трубопровода до зеркала воды более 25 м. Всего таких переходов около 40, больше всего в Волго-Камском бассейне и на реках Сибири.

Анализ результатов обследования подводных переходов показывает наличие отклонений от нормативных требований, из которых наиболее распространенным является несоответствие плано-высотному положению верхней образующей трубопровода. Однако образовавшиеся оголения и провисы непосредственно не приводят к разгерметизации трубопровода, но требуют проведения ремонтно-восстановительных работ.

Опыт эксплуатации стальных трубопроводов различного назначения показывает, что нарушение их герметичности часто происходит вследствие развития дефектов в стенке трубы, вызванного коррозией и старением металла под действием циклических нагрузок [1, 2].

Результаты проводимых нами исследований позволяют сделать предположение о том, что можно выбрать модели, позволяющие уменьшить погрешность при использовании доступной исходной информации. Это в конечном итоге позволит не только повысить качество точечных оценок надежности, но и сформировать их интервальные оценки, по сути, оценить качество прогноза, опираясь на робастные оценки.

В данной статье рассматривается один из возможных вариантов применения идеи робастности при оценке индивидуального остаточного ресурса по критерию малоциклового усталости, являющейся одним из основных процессов старения элементов трубопроводных систем. Согласно общепринятым моделям циклической усталости, срок безаварийной эксплуатации элемента конструкции с тем или иным дефектом определяется уровнем концентрации напряжений в зоне дефекта, характером циклических воздействий в зоне дефекта и прочностными характеристиками металла конструкции [3, 4].

Методика выбора модели прогнозирования малоциклового усталости одного из участков трубопровода - подводного перехода была основана на использовании следующих критериев:

- доступность входных параметров модели (под доступностью понимается возможность получения требуемых параметров модели современными техническими средствами);
- робастность модели, что позволяет, в одних случаях исключить указанный параметр из модели, в других - рассматривать указанный входной параметр как константу, т.к. влияние параметра незначимо, в допустимых пределах. В этом случае расчетная модель существенно упрощается без ущерба по отношению к требуемому качеству модели.

Рассмотрим математическую модель малоциклового усталости при наличии дефекта - трещины, предложенную в работах [2-4]:

$$\frac{d\lambda}{dN} = \alpha (\sigma \sqrt{\pi \lambda})^n,$$

где  $\lambda$  - размер трещины (длина), мм;  
 $N$  - число циклов нагружения конструкции;

$\sigma$  - нормальные напряжения в окрестности трещины, МПа;

$\alpha$  и  $n$  - параметры, адаптирующие модель (1) для системы трубопроводного транспорта.

Обычно при разработке моделей циклической долговечности трубопроводов пользуются некоторыми допущениями [3, 4]:

- все локальные дефекты находятся в стенке трубы;
- многие дефекты приводятся к типу «трещина» или трещиноподобному дефекту;
- производится расчет числа циклов на этапе развития (роста) трещины, поскольку в соответствии с [1, 4] у эксплуатируемого длительное время трубопровода в стенке уже присутствуют трещины (или трещиноподобные дефекты);
- форма трещиноподобного дефекта традиционно принимается близкой к полукругу, т.е.  $\lambda_0 = h_0$ , а  $\lambda_k = h_{кр}$ , где  $h_0$  - начальная глубина трещины;  $h_{кр}$  - конечная

глубина трещины, равная толщине стенки трубы [3-5];

- согласно [6], усталостная трещина в оболочковых конструкциях развивается эквидистантно, но глубина трещины не может превышать толщину стенки трубы в зоне дефекта  $h_{см}$ , т.е. критический размер

$$h_{кр} = h_{см} \geq \lambda \geq h_0;$$

- поскольку определение механических характеристик металла трубы связано со значительными трудностями, требуемые параметры определяются расчетным путем в соответствии с рекомендациями, изложенными в научно-технической литературе [3, 4]. В частности, значения коэффициентов ( $\alpha$ ,  $n$ ) рекомендуется принимать для трубных сталей:  $\alpha = 2.6 \cdot 10^{-13}$  мм<sup>7</sup>/кгс<sup>4</sup> и  $n = 4$  соответственно.

Соотношение (1) интегрируется на отрезке  $(\lambda_0; \lambda_k)$ , после чего можно получить выражение, которое позволяет построить оценку предельного числа циклов нагружения (числа циклов, после которого с высокой вероятностью наступает разрушение трубы):

$$N_{кр} = \int_{\lambda_0}^{\lambda_k} \frac{d\lambda}{\alpha \cdot (\sigma \sqrt{\pi \lambda})^n} = \frac{1}{\alpha \cdot \sigma^n \pi^{n/2}} \int_{\lambda_0}^{\lambda_k} \lambda^{-n/2} d\lambda = \frac{\lambda_k^{1-n/2} - \lambda_0^{1-n/2}}{\alpha \cdot \sigma^n \cdot \pi^{n/2} \cdot (1-n/2)}.$$

С учетом вышеприведенных рекомендаций ( $n = 4$ ) получим

$$N_{кр} = \frac{1}{\alpha \cdot \sigma^4 \cdot \pi^2} \cdot \left( \frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda_k} \right) = \frac{1}{\alpha \cdot \pi^2} \cdot \sigma^{-4} \cdot \left( \frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda_k} \right). \quad (2)$$

В выражении (2) выделим константы ( $\alpha$ ,  $n$ ,  $\pi$ ) и переменные ( $\sigma$ ,  $\lambda_0$ ,  $\lambda_k$ ).

После преобразований получим:

$$N_{кр} = C_N \cdot \sigma^{-4} \left( \frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda_k} \right) = C_N \cdot \Phi(\lambda_0, \lambda_k, \sigma), \quad (3)$$

где  $C_N = \frac{1}{\alpha \cdot \pi^2}$ ,  $\Phi(\lambda_0, \lambda_k, \sigma) = \sigma^{-4} \left( \frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda_k} \right)$ .

Согласно [6], погрешность выходной величины  $\Delta N_{\text{кр}}$  модели (3) можно представить соотношением:

$$\Delta N_{\text{кр}} = C_N \cdot \left\{ \left| \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_o} \right| \cdot \Delta \lambda_o + \left| \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_k} \right| \cdot \Delta \lambda_k + \left| \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \right| \cdot \Delta \sigma \right\}. \quad (4)$$

С учетом (3) первое слагаемое в выражении (4) можно преобразовать следующим образом:

$$\Delta N_{\text{кр}} = C_N \cdot \left[ \frac{\lambda_k \cdot \Delta \lambda_o}{\lambda_o \cdot (\lambda_k - \lambda_o)} + \frac{\lambda_o \cdot \Delta \lambda_k}{\lambda_k \cdot (\lambda_k - \lambda_o)} + \frac{4}{\sigma} \cdot \Delta \sigma \right] \cdot \Phi(\lambda_o, \lambda_k, \sigma). \quad (5)$$

В рамках поставленной задачи рационально использовать относительные погрешности как входных величин, так и целевого параметра (критического размера трещины).

В данном случае относительные погрешности составляющих в выражении (5) обозначим:  $\mu_o = \Delta \lambda_o / \lambda_o$ ,  $\mu_k = \Delta \lambda_k / \lambda_k$ ,  $\mu_\sigma = \Delta \sigma / \sigma$ .

Для упрощения процедуры анализа выходной величины используем значение относительной погрешности критического размера трещины:

$$\begin{aligned} \mu_N(\lambda_o, \mu_o, \lambda_k, \mu_k, \sigma, \mu_\sigma) &= \frac{\Delta N_{\text{кр}}(\lambda_o, \mu_o, \lambda_k, \mu_k, \sigma, \mu_\sigma)}{N_{\text{кр}}(\lambda_o, \lambda_k, \sigma)} = \\ &= \frac{C_N \cdot \left[ \frac{\lambda_k \cdot \Delta \lambda_o}{\lambda_o \cdot (\lambda_k - \lambda_o)} + \frac{\lambda_o \cdot \Delta \lambda_k}{\lambda_k \cdot (\lambda_k - \lambda_o)} + \frac{4}{\sigma} \cdot \Delta \sigma \right] \cdot \Phi(\lambda_o, \lambda_k, \sigma)}{C_N \cdot \Phi(\lambda_o, \lambda_k, \sigma)} = \frac{\lambda_k \cdot \mu_o}{(\lambda_k - \lambda_o)} + \frac{\lambda_o \cdot \mu_k}{(\lambda_k - \lambda_o)} + 4\mu_\sigma. \end{aligned} \quad (6)$$

В итоге получена зависимость, обладающая определенными преимуществами перед моделью (4), она не зависит от констант, которые адаптируют модель (1) к условиям, характерным для расчетов участков линейной части магистрального нефтепровода:

$$\mu_N(\lambda_o, \mu_o, \lambda_k, \mu_k, \sigma, \mu_\sigma) = \frac{\lambda_k \cdot \mu_o}{(\lambda_k - \lambda_o)} + \frac{\lambda_o \cdot \mu_k}{(\lambda_k - \lambda_o)} + 4\mu_\sigma.$$

В полученном выражении относительная погрешность  $\mu_N(\lambda_o, \mu_o, \lambda_k, \mu_k, \sigma, \mu_\sigma)$  не зависит от уровня напряжений.

При вычислении относительной погрешности величины критического числа циклов, учитывая (6), имеем:

$$\Delta N_{\text{кр}}(\lambda_o, \mu_o, \lambda_k, \mu_k, \sigma, \mu_\sigma) = \mu_N(\lambda_o, \mu_o, \lambda_k, \mu_k, \sigma, \mu_\sigma) \cdot N_{\text{кр}}(\lambda_o, \lambda_k, \sigma). \quad (7)$$

Отметим, что в правой части соотношения (7) уровень напряжений ( $\sigma$ ) используется при вычислении  $N_{\text{кр}}(\lambda_o, \lambda_k, \sigma)$ , а, значит, влияет на абсолютную погрешность определения  $N_{\text{кр}}$ .

Поскольку целью данной работы является анализ робастности математической модели (1), на этапе предварительного (качественного) анализа имеет смысл рассматривать вариант, когда все относительные погрешности входных величин равны, т.е.  $\mu_o = \mu_k = \mu_\sigma = \mu$ :

$$\mu_N(\lambda_o, \lambda_k, \mu) = \frac{\lambda_k \cdot \mu_o}{(\lambda_k - \lambda_o)} + \frac{\lambda_o \cdot \mu_k}{(\lambda_k - \lambda_o)} + 4\mu_\sigma = \mu \cdot \left[ \frac{\lambda_k}{(\lambda_k - \lambda_o)} + \frac{\lambda_o}{(\lambda_k - \lambda_o)} + 4 \right]. \quad (8)$$

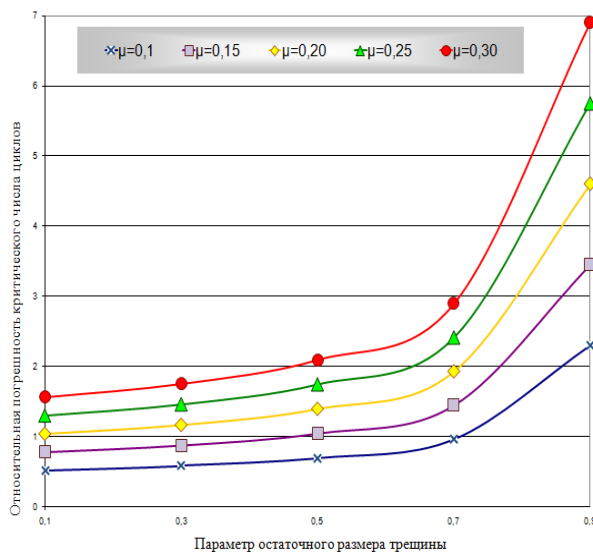
Введем параметр (безразмерная величина) остаточного размера трещины  $\lambda = \lambda_o / \lambda_k$ , т.е. отношение начальной глубины трещины к толщине стенки трубы, который более информативен на этапе предварительного анализа модели (1) и в соответствии с принятыми допущениями  $0 < \lambda < 1$ :

$$\tilde{\mu}_N(\mu, \lambda) = \mu \cdot \left( 4 + \frac{1 + \lambda}{1 - \lambda} \right), \quad (9)$$

где  $\tilde{\mu}_N(\mu, \lambda)$  - относительная погрешность определения критического числа циклов при равенстве относительных погрешностей всех входных величин.

Для формирования предварительных выводов относительно чувствительности модели (1) построим графики зависимости величины  $\tilde{\mu}_N(\mu, \lambda)$  от параметра остаточного размера трещины  $\lambda$  (9) и приведенной погрешности  $\mu = \mu_o = \mu_k = \mu_\sigma$  (рисунок 1).

Проведенные исследования функции относительной погрешности критического размера трещины (8) позволяют сделать *общие выводы относительно робастности математической модели циклической долговечности*:



**Рисунок 1.** Зависимость относительной погрешности критического числа циклов от параметра остаточного размера трещины

- 1) величина относительной погрешности определения критического числа циклов нагружения  $\Delta N_{кр}$  не зависит от уровня напряжений в окрестности трещины, но линейно зависит от погрешности определения этих напряжений  $\mu$  (7);
- 2) размеры усталостной трещины, и начальный, и критический ( $\lambda_o, \lambda_k$ ), влияют на относительную погрешность критического размера трещины ( $\Delta N_{кр} / N_{кр}$ ), но их влияние проявляется в достаточно сложной связи квадратов начального и критического размеров и относительной погрешности измерения (вычисления) этих величин. Следует иметь в виду, что уровень влияния каждой из этих величин зависит не только от погрешностей измерения, но и от способа получения этой информации: в одном случае это аппаратные методы, в другом - математические и (или) комбинированные;
- 3) существенное значение при определении величины относительной погрешности  $\Delta N_{кр} / N_{кр}$  имеют и погрешности используемых при принятии решений значений констант, т.е. погрешности, связанные с принимаемыми при их определении допущениями;
- 4) в первом приближении можно ограничиться предлагаемыми результатами исследований, но для совершенствования анализа качества математических моделей прогнозирования технического состояния, а значит, и эффективности системы технического обслуживания и ремонта подводных переходов трубопроводов, необходимы новые парадигмы получения информации, её анализа, алгоритмов и способов обработки.

### Вывод

Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о том, что возможен выбор математических моделей, позволяющих уменьшить погрешность при использовании доступной исходной информации. В конечном итоге это позволит не только увеличить качество точечных оценок надеж-

ности, но и сформировать их интервальные оценки, т.е., по сути, оценить качество прогноза, опираясь на робастные оценки. Это также позволит качественно прогнозировать индивидуальный остаточный ресурс каждого

элемента системы, в том числе подводного перехода, что приведет к повышению эффективности всей системы, т.е. к увеличению надежности при снижении затрат на ее обеспечение.

#### Список литературы

1. Мазур И.И., Иванцов О.М. Безопасность трубопроводных систем. М.: ИЦ «ЕЛИМА», 2004. 1104 с.
2. Набиев Р.Р. Планирование ремонтно-восстановительных работ нефтепроводов с учетом надежности и экологической безопасности: дисс. ... канд. техн. наук. Уфа, 1998. 136 с.
3. Кагаев В.В., Махутов Н.А., Гусейнов А.П. Расчеты деталей машин конструкций на прочность и долговечность. М.: Машиностроение, 1985. 224 с.
4. Халимов А.Г., Зайнуллин Р.С., Халимов А.А. Техническая диагностика и оценка ресурса нефтегазохимического оборудования. СПб.: Недра, 2012. 568 с.
5. Шлянников В.Н., Чадаев Д.А. Анализ изменения формы усталостной поверхностной трещины в трубопроводе // Проблемы прочности. 2003. № 5. С. 80-92.
6. Бакулин И.Е. Математическая модель погрешностей инерциальной навигационной системы аэробаллистического летательного аппарата // Системы обработки информации. Харьков, 2004. Вып. 11 (39). С. 11-18.

#### Авторы

• Сайфутдинов Аскар Ильдарович  
Уфимский государственный нефтяной  
технический университет  
Аспирант кафедры «Транспорт и хранение  
нефти и газа»  
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,  
ул. Космонавтов, 1

• Коробков Геннадий Евгеньевич, доктор  
технических наук, профессор  
Уфимский государственный нефтяной  
технический университет  
Профессор кафедры «Транспорт и хранение  
нефти и газа»  
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,  
ул. Космонавтов, 1  
e-mail: korobkov45@mail.ru

#### References

1. Mazur I.I., Ivantsov O.M. *Bezopasnost' truboprovodnykh sistem* [Safety of Pipeline Systems]. Moscow, ITS «ELIMA», 2004. 1104 p. [in Russian].
2. Nabiev R.R. *Planirovanie remontno-восстановitel'nykh rabot nefteprovodov s uchetom nadezhnosti i ekologicheskoi bezopasnosti: diss. kand. tekhn. nauk* [Planning of Repair and Restoration Works of Oil Pipelines taking into Account Reliability and Ecological Safety: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, 1998. 136 p. [in Russian].
3. Kagaev V.V., Makhutov N.A., Guseinov A.P. *Raschety detalei mashin konstruktssii na prochnost' i dolgovrechnost'* [Calculations of Machine Components for Strength and Durability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 224 p. [in Russian].
4. Khalimov A.G., Zainullin R.S., Khalimov A.A. *Tekhnicheskaya diagnostika i otsenka resursa neftegazokhimicheskogo oborudovaniya* [Technical Diagnostics and Evaluation of the Resource of Oil and Gas Chemical Equipment]. Saint-Petersburg, Nedra Publ., 2012. 568 p. [in Russian].
5. Shlyannikov V.N., Chadaev D.A. Analiz izmeneniya formy ustalostnoi poverkhnostnoi treshchiny v truboprovode [Analysis of the Change in the Shape of the Fatigue Surface Crack in the Pipeline]. *Problemy prochnosti - Problems of Strength*, 2003, No. 5, pp. 80-92. [in Russian].
6. Bakulin I.E. Matematicheskaya model' pogreshnostei inertsiyal'noi navigatsionnoi sistemy aeroballisticheskogo letatel'nogo apparata [Mathematical Model of Errors in the Inertial Navigation System of an Aerobalistic Aircraft]. *Sistemy obrabki informatsii - Information Processing Systems*, Kharkov, 2004, Vip. 11 (39), pp. 11-18.

#### The Authors

• Sayfutdinov Askar I.  
Ufa State Petroleum Technological University  
Post-graduate Student of Transport and Storage of  
Oil and Gas Department  
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,  
Russian Federation

• Korobkov Gennadiy E., Doctor of Engineering  
Sciences, Professor  
Ufa State Petroleum Technological University  
Professor of Transport and Storage of Oil and Gas  
Department  
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,  
Russian Federation  
e-mail: korobkov45@mail.ru