

УДК 621.64

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТРУБОПРОВОДА ПРИ НАЛИЧИИ ДЕФЕКТА ТИПА ТРЕЩИНЫ

С.В. Глушков

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва
Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

Предлагается методика оценки остаточного ресурса трубопровода при наличии наружной или внутренней трещины, ориентированной в осевом или окружном направлении. Ее основу составляют методы интерполяционных полиномов и статистических испытаний. Методика реализована в виде программы, представляющей собой Windows-приложение с современным удобным интерфейсом.

Ключевые слова: *остаточный ресурс, живучесть, трещиноподобный дефект, трубопровод, надежность, случайный процесс.*

Дефекты в виде трещин, возникающие в элементах трубопроводных систем на стадии производства или при их эксплуатации, развиваются в течение некоторого периода времени, который определяет живучесть конструкции. В настоящей работе предлагается методика, позволяющая оценить остаточный ресурс трубопровода, содержащего поверхностную трещину. В ее основе лежат следующие положения:

- обнаруженный методами неразрушающего контроля реальный дефект заменяется модельной двухпараметрической трещиной полуэллиптической формы;
- модельная трещина имеет окружную или осевую ориентацию и располагается на наружной или внутренней поверхности стенки трубы;
- нагружение трубопровода представляет собой стационарный случайный процесс с известными спектральными характеристиками;
- трещина развивается во времени, сохраняя при этом полуэллиптическую форму;
- скорости роста дефекта в направлениях глубины и длины определяются величинами размаха коэффициента интенсивности напряжений в характерных точках;
- прорастание трещины на всю толщину стенки до образования течи или хрупкое разрушение конструкции трактуется как отказ;
- время от момента обнаружения дефекта и до наступления отказа понимается как расчетная живучесть конструкции.

При решении задачи статистической динамики требуется по известным характеристикам входной случайной функции строить ее выборочные функции – реализации. Данная проблема решается представлением случайных процессов в виде детерминированных функций некоторой совокупности случайных величин.

Трубопровод в процессе эксплуатации испытывает различные нагрузки и воздействия, которые в общем случае представляют собой случайные пространственно-временные функции, чаще всего стационарные, т. е. не изменяющие своих вероятностных характеристик с течением времени. Реальный широкополосный случайный процесс нагружения $N(t)$ будем схематизировать суперпози-

Сергей Валериевич Глушков, ассистент кафедры «Космическое машиностроение».

цией n узкополосных процессов, имеющих типовые спектральные плотности с одним максимумом. В работе [1] представлены корреляционные функции и спектральные плотности узкополосных стационарных процессов, которые наиболее часто используются для аппроксимации реальных характеристик нагружения трубопроводных систем. Применяя неканоническое разложение к каждой составляющей широкополосного процесса, можно записать [1, 2]:

$$N(t) = \sum_{i=1}^n \left(\langle N^{(i)}(t) \rangle + \gamma^{(i)} \sin \omega^{(i)} t + \delta^{(i)} \cos \omega^{(i)} t \right), \quad (1)$$

где $\langle N^{(i)}(t) \rangle$ – математическое ожидание; а $\gamma^{(i)}$, $\delta^{(i)}$ и $\omega^{(i)}$ – независимые случайные величины неканонического разложения i -го узкополосного процесса.

В качестве основных входных случайных величин выбираются наружный диаметр трубы D , толщина стенки h , а также характерные размеры начального дефекта – глубина l_0 и полудлина a_0 . Принимается, что они распределены по нормальному закону с известными математическими ожиданиями и дисперсиями. Здесь и далее через $\langle x \rangle$ и $D[x]$ будем обозначать математическое ожидание и дисперсию случайной величины x .

Стохастические границы области допустимых состояний дефекта будем определять критической глубиной трещины l_c и циклической вязкостью разрушения K_{fc} . Обычно они распределены нормально. Учитывая, что критическая глубина трещины характеризует герметичность трубы, можно принять ее равной 80...100 % толщины стенки, т. е. положить $\langle l_c \rangle = (0,8...1,0)\langle h \rangle$, $D[l_c] = (0,8...1,0)^2 D[h]$.

Для рассматриваемого конструктивного элемента, содержащего поверхностный дефект, при реализации предлагаемой методики требуется зависимость коэффициента интенсивности напряжений от нагрузки, параметров трещины и геометрических размеров сечения в нескольких характерных точках фронта дефекта:

$$K(t) = K(D, h, l(t), a(t), N(t)). \quad (2)$$

Пример такой зависимости для труб, содержащих поверхностные трещины, показан в работе [3]. В статье [4] представлена технология компьютерного моделирования сквозных трещин в САЕ-системе ANSYS. С ее помощью можно установить требуемую зависимость для произвольной тонкостенной конструкции, в том числе и для трубопроводов.

Характерные точки будем обозначать буквами A и B , причем первая из них располагается в точке максимальной глубины фронта дефекта, а вторая – в окрестности выхода фронта трещины на поверхность конструкции [4].

В настоящей работе для оценки остаточного ресурса трубопроводов предлагаются два подхода к решению задачи статистической динамики. Первый из них основывается на использовании метода интерполяционных полиномов Чернецкого, а второй – на методе статистических испытаний Монте-Карло.

Идея решения при помощи метода интерполяционных полиномов заключается в следующих шагах.

1. В зависимости от класса опасности трубопровода назначается нормативный уровень надежности H^n .

2. Для наружного диаметра и толщины стенки выбираются числа узлов интерполяции q_D , q_h и определяются значения узлов типа Чебышева по формулам

$$D_{k_D} = \langle D \rangle + \lambda_{k_D} \sqrt{D[D]}, \quad (k_D = 1, 2, \dots, q_D);$$

$$D_{k_h} = \langle h \rangle + \lambda_{k_h} \sqrt{D[h]}, \quad (k_h = 1, 2, \dots, q_h).$$

Здесь λ_{k_D} и λ_{k_h} – табличные значения узлов типа Чебышева для «стандартного» нормального закона распределения.

Аналогичным образом выбираются числа узлов интерполяции q_l и q_a для глубины и полудлины трещины и определяются значения в этих узлах.

3. Действующая на трубопровод случайная нагрузка $N(t)$ представляется в виде суперпозиции стационарных узкополосных процессов с заданными спектральными плотностями (см. формулу (1)). Каждый узкополосный процесс заменяется неканоническим разложением. Задаются числа узлов интерполяции $q_\gamma^{(i)}$, $q_\delta^{(i)}$ и $q_\omega^{(i)}$. Далее строятся реализации случайного процесса нагружения:

$$N_{k_N}(t) = \sum_{i=1}^n \left(\langle N^{(i)}(t) \rangle + \gamma_{k_\gamma^{(i)}}^{(i)} \sin \omega_{k_\omega^{(i)}}^{(i)} t + \delta_{k_\delta^{(i)}}^{(i)} \cos \omega_{k_\omega^{(i)}}^{(i)} t \right), \quad (3)$$

где $k_N = 1, 2, \dots, q_N$ – текущий номер реализации, определяемый перебором индексов $k_\gamma^{(1)}$, $k_\delta^{(1)}$, $k_\omega^{(1)}$, $k_\gamma^{(2)}$, $k_\delta^{(2)}$, $k_\omega^{(2)}$, ..., $k_\gamma^{(n)}$, $k_\delta^{(n)}$, $k_\omega^{(n)}$; $q_N = \prod_{i=1}^n q_\gamma^{(i)} q_\delta^{(i)} q_\omega^{(i)}$ – общее число реализаций.

Как видно из (3), для частоты $\omega_{k_\omega^{(i)}}^{(i)}$ все реализации имеют одинаковую амплитуду изменения нагрузки, величина которой определяется выражением

$$A_{k_\gamma^{(i)}, k_\delta^{(i)}}^{(i)} = \sqrt{\left(\gamma_{k_\gamma^{(i)}}^{(i)} \right)^2 + \left(\delta_{k_\delta^{(i)}}^{(i)} \right)^2}. \quad (4)$$

Верхние оценки максимальных значений нагрузки на реализациях можно найти следующим образом:

$$N_{k_{N_{\max}}}^{\max} = \sum_{i=1}^n \left(\langle N^{(i)}(t) \rangle + A_{k_\gamma^{(i)}, k_\delta^{(i)}}^{(i)} \right). \quad (5)$$

Здесь $k_{N_{\max}} = 1, 2, \dots, q_{N_{\max}}$ – текущий номер реализации с уникальным максимальным значением нагрузки, определяемый перебором индексов $k_\gamma^{(1)}$, $k_\delta^{(1)}$, $k_\omega^{(1)}$, $k_\gamma^{(2)}$, $k_\delta^{(2)}$, $k_\omega^{(2)}$, ..., $k_\gamma^{(n)}$, $k_\delta^{(n)}$, $k_\omega^{(n)}$; $q_{N_{\max}} = \prod_{i=1}^n q_\gamma^{(i)} q_\delta^{(i)}$ – общее число таких реализаций.

4. Для характерных размеров поверхностной трещины (глубины l и полудлины a) определяются их значения в узлах интерполяции:

$$l_{k_l}(t) = \langle l(t) \rangle + \lambda_{k_l} \sqrt{D[l(t)]}, \quad (k_l = 1, 2, \dots, q_l);$$

$$a_{k_a}(t) = \langle a(t) \rangle + \lambda_{k_a} \sqrt{D[a(t)]}, \quad (k_a = 1, 2, \dots, q_a).$$

Здесь λ_{k_l} и λ_{k_a} – табличные значения узлов типа Чебышева для «стандартного» нормального закона распределения. При этом

$$\langle l(0) \rangle = \langle l_0 \rangle; \quad D[l(0)] = D[l_0];$$

$$\langle a(0) \rangle = \langle a_0 \rangle; \quad D[a(0)] = D[a_0].$$

5. По максимальным значениям нагрузки на реализациях в узлах интерполяции находятся максимальные значения коэффициента интенсивности напряжений $K_{k_K}^{\max}(t)$ в характерных точках фронта дефекта:

$$K_{k_K}^{\max}(t) = K(D_{k_D}, h_{k_h}, l_{k_l}(t), a_{k_a}(t), N_{k_{N_{\max}}}^{\max}). \quad (6)$$

Здесь $k_K = 1, 2, \dots, q_K$ – текущий номер узла интерполяции случайной величины $K^{\max}(t)$, определяемый перебором индексов $k_{N_{\max}}$, k_D , k_h , k_l и k_a ; $q_K = q_{N_{\max}} q_l q_a q_D q_h$ – общее число узлов интерполяции случайной величины $K^{\max}(t)$.

6. По формулам метода интерполяционных полиномов [2, 5] вычисляются начальные и центральные моменты распределения случайной величины максимального коэффициента интенсивности напряжений в характерных точках:

$$\langle K^{\max}(t) \rangle = \sum_{k_K=1}^{q_K} K_{k_K}^{\max}(t) \rho_{k_K};$$

$$D[K^{\max}(t)] = \sum_{k_K=1}^{q_K} [K_{k_K}^{\max}(t) - \langle K^{\max}(t) \rangle]^2 \rho_{k_K},$$

где

$$\rho_{k_K} = \left(\prod_{i=1}^n \rho_{k_i^{(i)}} \right) \rho_{k_l} \rho_{k_a} \rho_{k_D} \rho_{k_h}.$$

Здесь и далее через ρ_{k_x} обозначены числа Кристоффеля случайной величины x .

7. По приближенной формуле модели цепи при постепенном отказе проводится оценка функции надежности:

$$H(t) = \frac{H_1(t)H_2(t)}{H_1(t) + H_2(t) - H_1(t)H_2(t)}, \quad (7)$$

где

$$H_j(t) = \Phi(z_j).$$

Здесь j принимает значения 1 и 2; $\Phi(z)$ – нормальная функция распределения, вычисляемая по формуле

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp(-0,5t^2) dt,$$

а аргументы z_j рассчитываются следующим образом:

$$z_1 = \frac{\langle l_c \rangle - \langle l(t) \rangle}{\sqrt{D[l_c] + D[l(t)]}}, \quad z_2 = \min \left\{ \frac{\langle K_{fc} \rangle - \langle K^{\max}(t) \rangle}{\sqrt{D[K_{fc}] + D[K^{\max}(t)]}} \right\},$$

причем операция \min для аргумента z_2 выбирает наименьшее из значений, вычисленных для каждой характерной точки фронта трещины.

8. В том случае, если вычисленное по формуле (7) значение функции надежности окажется меньше заданной нормативной величины H^n , расчет прекраща-

ется. Момент времени, когда значение функции надежности совпадает с нормативной величиной, и определяет остаточный ресурс поврежденной конструкции.

9. В узлах интерполяции определяются значения размаха коэффициента интенсивности напряжений в характерных точках A и B фронта дефекта для каждой вычисленной по формуле (4) амплитуды нагрузки с использованием выражения (2):

$$\Delta K_{k_{\Delta K}}^{(i)}(t) = K \left(D_{k_D}, h_{k_h}, l_{k_l}(t), a_{k_a}(t), 2A_{k_\gamma, k_\delta}^{(i)} \right),$$

где $k_{\Delta K}^{(i)} = 1, 2, \dots, q_{\Delta K}^{(i)}$ – текущий номер узла интерполяции случайной величины $\Delta K^{(i)}(t)$, определяемый перебором индексов $k_D, k_h, k_l, k_a, k_\gamma$ и $k_\delta^{(i)}$; $q_{\Delta K}^{(i)} = q_\gamma^{(i)} q_\delta^{(i)} q_l q_a q_D q_h$ – общее число узлов интерполяции случайной величины $\Delta K^{(i)}(t)$.

10. Выбирается достаточно малый интервал времени Δt . При этом для вычисления скорости роста усталостной трещины используется уравнение П. Пэриса и Ф. Эрдогана в форме

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^m, \quad (8)$$

где C и m – константы материала.

Путем интегрирования этого уравнения в узлах интерполяции независимо по каждому характерному размеру дефекта (глубине и полудлине) определяются приращения размеров трещины за малый промежуток времени:

$$\Delta l_{k_{\Delta l}}(t) = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\Delta K_{A k_{\Delta K}}^{(i)}(t) \right]^m \omega_{k_\omega}^{(i)} \right\} C \frac{\Delta t}{2\pi};$$

$$\Delta a_{k_{\Delta a}}(t) = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\Delta K_{B k_{\Delta K}}^{(i)}(t) \right]^m \omega_{k_\omega}^{(i)} \right\} C \frac{\Delta t}{2\pi},$$

где нижний индекс A и B у величины $\Delta K_{k_{\Delta K}}^{(i)}(t)$ показывает наименование характерной точки дефекта; $k_{\Delta l} = 1, 2, \dots, q_{\Delta l}$ – текущий номер узла интерполяции случайной величины $\Delta l(t)$ (или $\Delta a(t)$), определяемый перебором индексов $k_K, k_\omega^{(1)}, \dots, k_\omega^{(n)}$; $q_{\Delta l} = q_K \prod_{i=1}^n q_\omega^{(i)}$ – общее число узлов интерполяции.

11. По формулам метода интерполяционных полиномов находятся значения начальных и центральных моментов распределения случайных величин приращений характерных размеров трещины в момент времени t :

$$\langle \Delta l(t) \rangle = \sum_{k_{\Delta l}=1}^{q_{\Delta l}} \Delta l_{k_{\Delta l}}(t) \rho_{k_{\Delta l}};$$

$$D[\Delta l(t)] = \sum_{k_{\Delta l}=1}^{q_{\Delta l}} \left[\Delta l_{k_{\Delta l}}(t) - \langle \Delta l(t) \rangle \right]^2 \rho_{k_{\Delta l}},$$

для приращения характерного размера $\Delta a(t)$ формулы записываются аналогичным образом. Здесь $\rho_{k_{\Delta l}} = \rho_{k_K} \prod_{i=1}^n \rho_{k_\omega^{(i)}}$.

12. Осуществляется переход к моменту времени $t + \Delta t$ и вычисляются соот-

ветствующие ему новые начальные и центральные моменты распределения случайных величин характерных размеров трещины:

$$\langle l(t + \Delta t) \rangle = \langle l(t) \rangle + \langle \Delta l(t) \rangle ; \quad (9)$$

$$D[l(t + \Delta t)] = D[l(t)] + D[\Delta l(t)], \quad (10)$$

для полудлины дефекта формулы имеют аналогичный вид.

13. Расчет по приведенному алгоритму продолжается с шага 4 до тех пор, пока значение функции надежности не окажется меньше нормативной величины H^n .

Второй подход к решению задачи статистической динамики базируется на методе статистических испытаний. В отличие от предыдущего случая здесь значения входных случайных величин не определяются в предварительно назначенных узлах интерполяции (разных для каждой случайной величины), а генерируются при помощи датчика случайных чисел. При этом начальные и центральные моменты распределения выходной случайной величины (например приращение глубины трещины) определяются как

$$\langle \Delta l(t) \rangle = \frac{1}{q} \sum_{k=1}^q \Delta l_k(t) ;$$

$$D[\Delta l(t)] = \frac{1}{q-1} \sum_{k=1}^q [\Delta l_k(t) - \langle \Delta l(t) \rangle]^2 ,$$

где q – заданное число реализаций.

Рассмотренная методика реализована в виде программы PipeResource [6], представляющей собой Windows-приложение. Она предназначена для вычислительной оценки уровня надежности поврежденного участка трубопроводной системы в условиях случайного нагружения в стохастической постановке и исследования динамики изменения этой оценки, а также прогноза живучести конструкции (то есть определения ее остаточного ресурса). Интерфейс программы показан на рис. 1.

В качестве примера рассмотрим трубопровод 1020×15 из стали 10Г2Ф, содержащий наружную осевую трещину с размерами $\langle l_0 \rangle = 3$ мм и $\langle a_0 \rangle = 5$ мм. Наружный диаметр будем считать детерминированной величиной. Коэффициент вариации толщины стенки примем равным 0,02, а для размеров трещины – 0,05.

Будем считать, что внутреннее давление продукта представляет собой стационарный случайный процесс сложной конфигурации с математическим ожиданием $\langle p \rangle = 7,4$ МПа и спектральной плотностью, представленной на графике на рис. 1. Здесь ступенчатая линия показывает теоретическую кривую, а гладкая – значения, рассчитанные с использованием неканонического разложения моделируемого процесса.

Для магистрального трубопровода большого диаметра как объекта повышенного класса опасности уровень нормативной надежности примем равным 0,99. Критическую глубину трещины будем полагать равной 90 % толщины стенки.

Проведенные расчеты позволили построить график изменения функции надежности от времени (рис. 2). Остаточный ресурс трубопровода составляет приблизительно 9550 часов (397 суток) при расчете по методу интерполяционных полиномов. В случае использования метода статистических испытаний полученная оценка остаточного ресурса составила 9457 часов (394 дня).

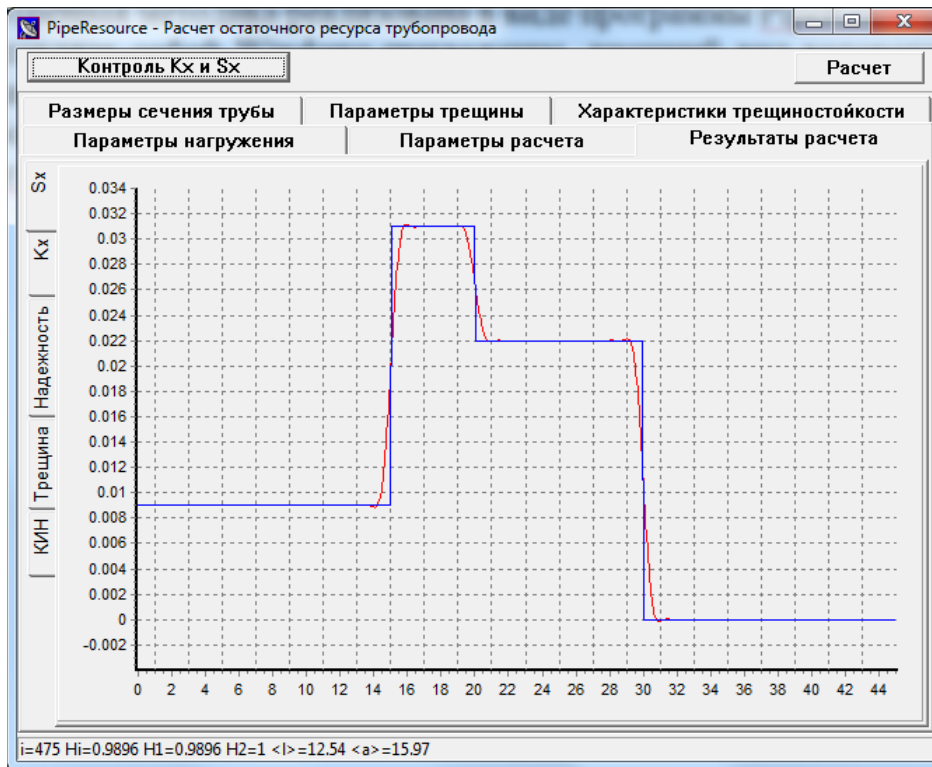


Рис. 1. Интерфейс программы

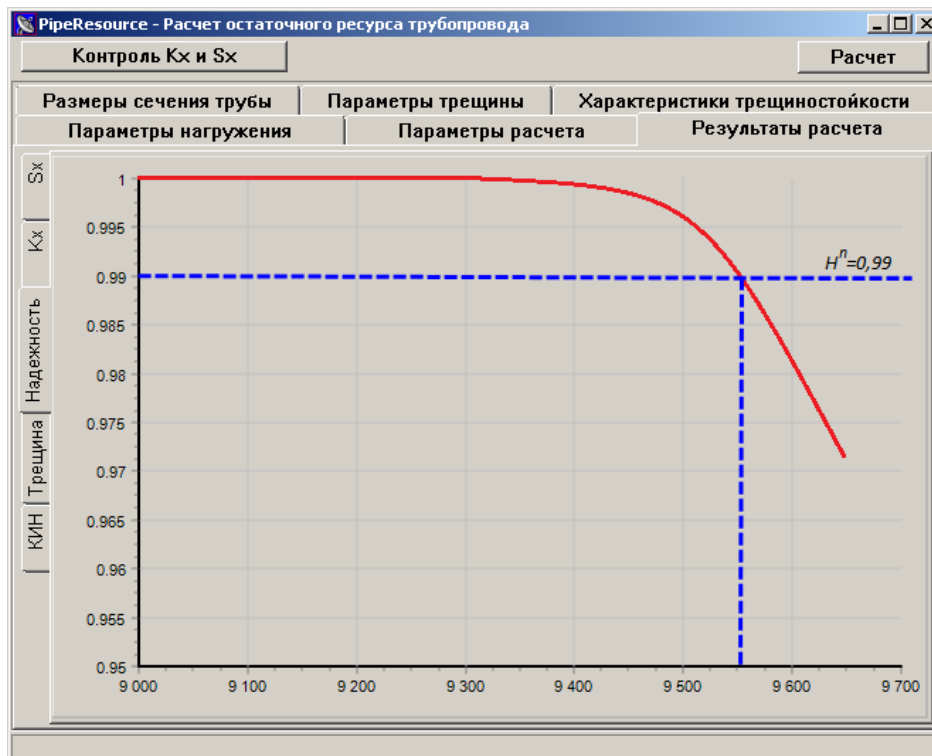


Рис. 2. График функции надежности

Следует отметить, что при расчете по методу интерполяционных полиномов для толщины стенки и характерных размеров дефекта выбиралось по три узла интерполяции, а для двух элементарных случайных процессов, описывающих давление продукта, выбрано по три узла для величин $\delta^{(i)}$ и $\gamma^{(i)}$ неканонического разложения этих процессов и по девять узлов для величин $\omega^{(i)}$. Таким образом, общее количество реализаций составило 177147.

Метод статистических испытаний для обеспечения приемлемой точности потребовал использования выборки объемом 1000 реализаций. Однако вычислительная трудоемкость расчета одной реализации этим методом существенно выше, поэтому затраты машинного времени для обоих вариантов расчета сопоставимы.

Недостатком метода статистических испытаний является то, что величина остаточного ресурса, полученная этим методом, по сути представляет собой случайную величину, и последующие расчеты этого же трубопровода показывают, что остаточный ресурс лежит в интервале 9351...9734 часов. Поэтому при использовании метода статистических испытаний расчет необходимо проводить несколько раз для получения достоверной численной оценки остаточного ресурса трубопровода.

Выводы

Программа PipeResource предоставляет пользователю удобный инструмент для проведения оперативной оценки надежности участка трубопровода при известных параметрах поверхностной трещины и режимах работы исследуемой системы. С ее помощью можно:

- 1) исследовать динамику снижения уровня надежности участка трубопроводной системы при развитии дефекта;
- 2) оценивать живучесть рассматриваемого участка трубопровода с поверхностной трещиной;
- 3) проводить варьирование параметров нагружения с целью обоснованного изменения рабочего процесса перекачки продукта через поврежденный участок трубопровода;
- 4) определять допустимые размеры поверхностной трещины исходя из «назначенного» ресурса (т. е. проводить нормирование дефектов).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Перов С.Н., Скворцов Ю.В.* Представление случайных процессов с помощью неканонического разложения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2008. – № 1. – С. 226-235.
2. Обеспечение надежности трубопроводных систем / *С.Н. Перов, С.И. Аграфенин, Ю.В. Скворцов, Ю.Л. Тарасов.* – Самара: Изд-во СНЦ, 2008. – 246 с.
3. *Перов С.Н., Скворцов Ю.В., Цапурин К.А.* Коэффициенты интенсивности напряжений для труб с несквозными трещинами // Известия СНЦ РАН. – 2008. – Т. 10. – № 3. – С. 905-910.
4. *Скворцов Ю.В., Глушков С.В.* Моделирование несквозных поверхностных трещин в тонкостенных конструкциях // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – № 3 (27), Ч. 4. – С. 187-191.
5. *Перов С.Н., Скворцов Ю.В., Цапурин К.А.* Оценка надежности трубопроводных систем с трещинами методом интерполяционных полиномов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – Т. 76, № 5. – С. 49-52.
6. *Глушков С.В.* Программная реализация оценки живучести продуктопровода при наличии поверхностного дефекта // Обозрение прикладной и промышленной математики. – 2011. – Т. 18, Вып. 2. – С. 262-263.

Статья поступила в редакцию 4 апреля 2014 г.

PROBABILISTIC ESTIMATION OF RESIDUAL LIFE OF THE PIPELINES WITH CRACKS

S.V. Glushkov

Samara State Aerospace University
34, Moskovskoe sh., Samara, 443086, Russian Federation

The methods of assessing the residual life of the pipeline at presence of the outer or inner cracks oriented in the axial or circumferential direction. It is based on methods of interpolation polynomials and statistical tests. The method is realized in the form of a program, which is a Windows-based application with a modern user-friendly interface.

Keywords: residual life, survivability, cracks, pipeline, reliability, random process.