

УДК 517.958:531–133+624.042:621.644

## РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ С УЧЁТОМ ТРЕЩИНОПОДОБНЫХ ДЕФЕКТОВ И СЛОЖНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

*К. А. Цапурин*

ООО «Альянс»,  
129085, Россия, Москва, Проспект Мира, 101.  
E-mail: tsapurin@list.ru

*Существующие методы, обеспечивающие надёжность трубопроводных систем и основанные на нормативном подходе, не учитывают в явном виде не только временные факторы, но и вероятностную природу характеристик несущей способности и нагрузок, что зачастую приводит к назначению неоправданно высоких значений коэффициентов запаса прочности. В вероятностных методах отсутствуют данные недостатки, однако несмотря на то, что они достаточно широко проработаны в теории, на практике их применимость по ряду причин не превышает 1 %. В представленной работе разработаны и доведены до практического применения алгоритмы и методики расчётов, позволяющие как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации производить расчёт показателей надёжности трубопроводных систем в рамках теории классической статистики.*

**Ключевые слова:** *трубопровод, трещиноподобные дефекты, метод интерполяционных полиномов, неканоническое разложение, коэффициент интенсивности напряжений, задача статистической динамики, функция надёжности.*

В настоящее время добыча и транспортировка нефтепродуктов играет ключевую роль в экономике РФ. Протяжённость российских магистральных нефте- и газопроводов составляет более 200 тыс. км, промышленных трубопроводов — 350 тыс. км. Основной причиной разрушения трубопроводов является ослабление стенки трубы из-за наличия трещиноподобных дефектов, имеющих различную природу происхождения. Вместе с тем разработка новых месторождений на Сахалине, Камчатке, Дальнем Востоке вызвала необходимость проектирования и строительства новых путепроводов в условиях вечной мерзлоты, пучения и просадки грунтов, сейсмической активности и других экстремальных факторов. В связи с этим приобрела актуальность задача расчёта показателей надёжности трубопроводных систем.

В настоящий момент обеспечение надёжности трубопроводов на стадиях проектирования и эксплуатации осуществляется за счёт применения зачастую завышенных коэффициентов запаса прочности, что приводит к существенному увеличению металлоёмкости трубопроводов. Данные методы не учитывают в явном виде не только временные факторы, но и вероятностную природу характеристик несущей способности и нагрузок.

В современных вероятностных методах оценки надёжности отсутствуют эти недостатки, однако на данный момент их применимость на практике не превышает одного процента вследствие ряда причин: большой трудоёмкости моделирования трубопроводных систем; громоздких вычислений параметров механики разрушения для трубопроводов, эксплуатирующихся с распростра-

---

*Константин Александрович Цапурин, генеральный директор.*

няющейся усталостной трещиной; сложности моделирования и идентификации законов распределения внешних нагрузок (нестационарной или циклической нагруженности, влияния пучинистого грунта и т.д.).

Наиболее общий подход к расчёту надёжности, основанный на теории множеств, предложен в 1959 году В. В. Болотиным и развит им в стройную общую теорию надёжности, которая стала методологической основой проектирования сложных технических систем [1].

В данной работе предлагаются обобщённые методики расчёта параметров надёжности трубопроводных систем с учётом трещиноподобных дефектов и сложных условий эксплуатации, доведённые до практического применения.

Основная трудность применения теории надёжности В. В. Болотина состоит в её адаптации к конкретной предметной области. В частности, в работах [2–6] она использована для частных задач оценки показателей надёжности трубопроводных систем с учётом трещиноподобных дефектов. В работах [7–10] разработаны методы оценки показателей надёжности стержневых систем и толстостенных труб как на стадиях проектирования и эксплуатации в условиях ползучести по деформационным и катастрофическим критериям отказа, что позволило авторам [7–10] дать практические рекомендации по научно обоснованному выбору коэффициента запаса прочности в условиях существенного разбора экспериментальных данных реологической деформации.

Аналитическое решение задачи оценки надёжности элементов с распространяющейся усталостной трещиной возможно только в простейших случаях. На практике определение функции надёжности, особенно для сложных систем и непростых условий нагружения, возможно лишь с помощью ЭВМ и эффективных численных методов, среди которых наибольшее распространение получил метод конечных элементов, реализованный в пакете ANSYS.

При решении поставленной задачи для получения достоверных результатов необходимо построить объёмную модель конструкции в целом с достаточно мелким разбиением на конечные элементы, что приведёт к длительным и трудоёмким вычислениям. Поэтому для решения подобных задач разработан многоуровневый подход.

На первом этапе рассматривается вся трубопроводная система, для которой строится балочная модель. С её помощью определяется наиболее опасный участок трубопровода, где возникают максимальные напряжения. Далее, на втором этапе, рассматривается только этот участок. Для него строится уже оболочечная модель, к концевым сечениям которой прикладываются перемещения, найденные на первом этапе, т.е. с помощью балочной модели. На последнем (третьем) этапе рассматривается лишь фрагмент стенки трубы, где имеется дефект. Для данного фрагмента строится объёмная модель с дефектом. При этом в качестве граничных условий здесь задаются перемещения, найденные на втором этапе, на базе оболочечной модели. Даная методика позволяет на порядок сократить количество расчётов, сохраняя при этом требуемую точность вычислений. Для реализации этого алгоритма были разработаны программы-макросы, позволяющие автоматически выполнять построения на каждом этапе.

Для трубопроводов наибольший интерес представляют несквозные дефекты и в первую очередь — поверхностные трещины. При неполноте информа-

ции, а также для упрощения расчёта, используется аппроксимация трещиной полуэллиптической формы, описываемая двумя параметрами: глубиной  $l$  и длиной  $2a$  (рис. 1).

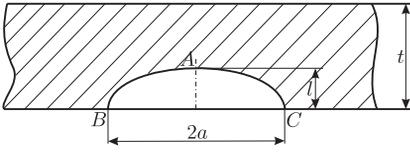


Рис. 1. Схематизация несквозной трещины

Для моделирования несквозных поверхностных трещин разработана программа-макрос, позволяющая автоматически строить объёмные сингулярные элементы (со смещёнными на четверть длины стороны промежуточными узлами) вокруг фронта трещины.

С использованием пакета ANSYS и разработанной методики моделирования трещин определены значения коэффициентов интенсивности напряжений для наиболее часто применяемых типоразмеров труб с учётом возможного наличия в них осевых и окружных (наружных и внутренних) трещин. Показано, что, зная величины рабочего давления  $p$  и локальных осевых напряжений  $\sigma$ , расчёт коэффициентов интенсивности напряжений для труб с осевой и окружной трещиной можно выполнять соответственно по формулам

$$K_I = M_p \frac{pR_{cp}}{t} \sqrt{\pi l}, \quad K_{II} = M_\sigma \sigma \sqrt{\pi l}, \quad (1)$$

где  $R_{cp}$  — средний радиус трубы. Безразмерные коэффициенты  $M_p$  и  $M_\sigma$  являются инвариантными по отношению как к диаметру трубы, так и к толщине её стенки. Для определения этих коэффициентов в точках  $A$  и  $B$  фронта трещины (см. рис. 1) в зависимости от отношений  $l/a$  и  $l/t$  составлены специальные таблицы [2, 3].

При решении задач статистической динамики были проведены исследования [4, 5], которые позволили сделать вывод о том, что при оценке надёжности трубопроводных систем расчёты целесообразно проводить методом интерполяционных полиномов, основная расчётная формула которого имеет вид

$$\langle \chi_\mu \rangle = \sum_{k=1}^q \chi_\mu(\Phi_{\mu k}) \rho_k.$$

Здесь  $\Phi_{\mu k} = \Phi_\mu(t, r_{1k_1}, r_{2k_2}, \dots, r_{mk_m})$  — значение функционала от выходных координат в узле интерполяции  $k$ ;  $\rho_k = \prod_{j=1}^m \rho_{k_j}$  — число Кристоффеля, соответствующее узлу интерполяции  $k$ ;  $q = q_1 q_2 \dots q_m$  — общее число узлов интерполяции; текущий номер узла интерполяции  $k$  находится соответствующим перебором индексов  $k_1, k_2, \dots, k_m$ .

Для представления входных случайных процессов предлагается использовать неканоническое разложение в сочетании с методом интерполяционных полиномов. При этом  $k$ -тая реализация случайного процесса  $x(t)$  записывается в виде

$$x_k(t) = \langle x(t) \rangle + \gamma_{k_1} \sin \omega_{k_3} t + \delta_{k_2} \cos \omega_{k_3} t, \quad (2)$$

где  $\gamma_{k_1}, \delta_{k_2}, \omega_{k_3}$  — значения независимых случайных величин  $\gamma, \delta, \omega$  в узлах интерполирования; номер  $k$  определяется соответствующим перебором индексов  $k_1, k_2$  и  $k_3$ .

Для магистральных трубопроводов разрушение конструкции происходит при прорастании трещины на всю толщину стенки трубы. Уравнение, определяющее поцикловую скорость роста усталостных трещин, в общем виде можно представить следующим образом:

$$dl/dN = \varphi(\sigma, l, \Delta K, r_1, r_2, \dots, r_s), \quad (3)$$

где  $dl/dN$  — скорость роста трещины;  $\sigma$  — амплитуда номинальных напряжений;  $l$  — текущая длина трещины;  $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$  — размах коэффициента интенсивности напряжений за рассматриваемый цикл нагружения;  $r_1, r_2, \dots, r_s$  — параметры, характеризующие условия эксплуатации, геометрические параметры, физические свойства материала.

В инженерной практике наибольшее распространение получила формула, предложенная П. Пэрисом, которая записывается в виде

$$dl/dN = C(\Delta K)^m,$$

где  $C$  и  $m$  — постоянные материала, определяемые экспериментально по кинетической диаграмме усталостного разрушения.

Модель постепенного отказа здесь является кумулятивной. Поэтому для функции надёжности следует записать:

$$H(t) = P\{l(t) < l_c; K_{\max}(\tau) < K_{fc}; \tau \in [0, t]\},$$

где  $l_c$  — критическая длина трещины, равная толщине стенки трубы;  $K_{fc}$  — циклическая вязкость разрушения. Оценку функции надёжности при постепенном отказе можно проводить по приближённой формуле модели цепи.

В предлагаемой методике пошагового вычисления значений функции надёжности решение задачи статистической динамики — определение параметров качества системы  $l(t)$  и  $K(t)$  — выполняется методом интерполяционных полиномов. При этом случайный стационарный процесс нагружения представляется неканоническим разложением (2), а поцикловая скорость роста усталостной трещины полностью определяется соотношением (3). Вычисления здесь продолжаются до тех пор, пока функция надёжности  $H(t)$  не станет меньше некоторой наперёд заданной величины  $H^H$  [6].

В качестве примера рассматривается подземный промысловый трубопровод для сбора газоконденсатной смеси. Для анализа его напряжённо-деформированного состояния используется многоуровневый подход. При вычислении показателей надёжности предполагается, что действующее на трубу внутреннее давление представляет собой стационарный случайный процесс  $p(t)$  с математическим ожиданием  $\langle p(t) \rangle = 20$  МПа, дисперсией  $D[p(t)] = (0,1\langle p(t) \rangle)^2$ . В результате вычислений получены зависимости математических ожиданий размеров трещины (рис. 2), а также зависимость функции надёжности от времени эксплуатации (рис. 3). Как показывают результаты расчета, при нормативной надёжности  $H^H = 0,99$  живучесть данного трубопровода с трещиной составляет 5,99 года.

Для оценки влияния сложных условий эксплуатации рассматривается задача анализа живучести напорного трубопровода технологической обвязки нефтеперекачивающей станции (НПС), работа насосных агрегатов которой

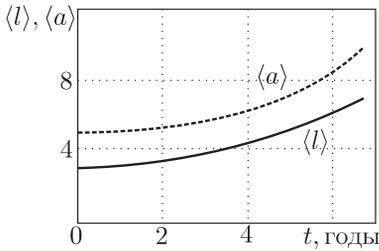


Рис. 2. Зависимости математических ожида- ний размеров трещины

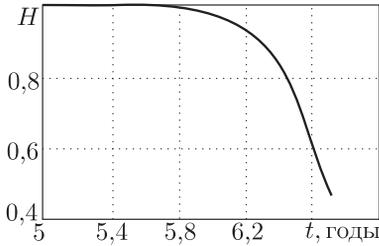


Рис. 3. Функция надёжности подземного трубопровода

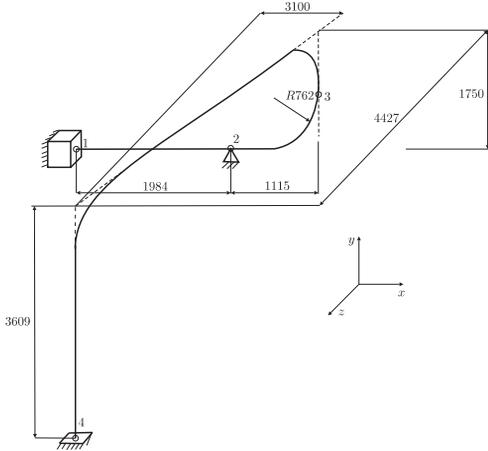


Рис. 4. Геометрия трубопровода

вызывает достаточно заметную вибрацию трубопроводов технологической обвязки. В связи с этим интерес представляет исследование вибропрочности технологических трубопроводов НПС.

При оценке живучести напорного трубопровода технологической обвязки нефтеперекачивающей станции (рис. 4) предполагается, что работа насосного агрегата вызывает виброперемещения, действующие на трубу в точке 1 и представляющие собой стационарный случайный узкополосный процесс  $u(t)$ .

Выполненный с помощью пакета ANSYS гармонический анализ вынужденных установившихся колебаний данной трубопроводной системы показывает, что максимальная амплитуда осевых фибровых напряжений имеет место в сечении, обозначенном на рис. 4 цифрой 3, в точке с окружной координатой  $\theta = 45^\circ$ , отсчитываемой от плоскости колена. Принимаем, что в данном месте имеется окружная наружная трещина полуэллиптической формы.

Считается, что толщина стенки трубы, начальная глубина и полу-длина трещины, а также циклическая вязкость разрушения являются случайными величинами, распределёнными по нормальному закону. Для решения задачи статистической динамики здесь используется метод интерполяционных полиномов, причём

для представления случайного процесса нагружения применяется неканоническое разложение (2). Скорость распространения трещины непостоянна вдоль её фронта и описывается с помощью модифицированных соотношений Пэриса. При этом расчёт коэффициентов интенсивности напряжений выполняется по второй формуле (1).

Рост усталостной трещины продолжается до тех пор, пока она не прорастёт на всю толщину стенки трубы или не достигнет длины, достаточной для начала заключительной стадии нестабильного разрушения. В результате решения задачи получено, что при нормативной надёжности  $H^H = 0,99$  и числе узлов интерполяции  $q_w = 18$  живучесть напорного трубопровода с трещиной составляет 9,03 года.

В качестве третьего примера решена задача оценки безопасности подземных трубопроводов с учетом сложных внешних нагрузок. В качестве объекта исследования рассматривается газопровод  $720 \times 14$ , изготовленный из стали 13Г1С-4 и прокладываемый в промерзающих пучинистых грунтах. При этом диаграмма деформирования материала схематично представляется в виде трёх функций, соответствующих участкам упругой работы, упругопластической работы и упрочнения.

Одним из самых трудоёмких этапов предлагаемой методики является моделирование силового воздействия бугра пучения на подземный трубопровод. Решение такой задачи должно проводиться в геометрически и физически нелинейной постановке, т.е. с учётом больших перемещений, пластических деформаций и нелинейности поведения окружающего трубу грунта.

Для автоматизации данного процесса разработана программа-макрос для пакета ANSYS. При этом реальный бугор пучения аппроксимируется расчётным бугром прямоугольной формы высотой  $H_0$  и длиной  $2\lambda_0$  (рис. 5). Поскольку мёрзлый грунт не является абсолютно жёстким, происходит частичное смятие бугра за счёт сил, действующих со стороны трубопровода.

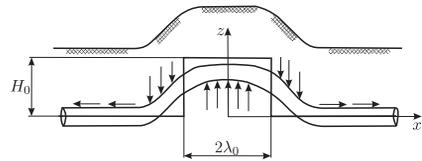


Рис. 5. Аппроксимация бугра пучения

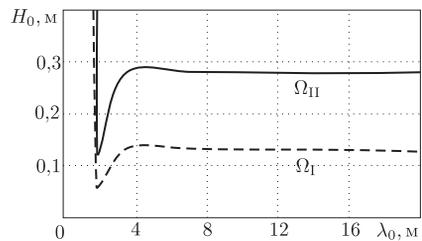


Рис. 6. Допустимые размеры бугров пучения

Выделяются два типа предельных состояний I и II. Первое связывается с наступлением текучести  $\sigma_{\text{Мизес}} = \sigma_{0,2}$ , где  $\sigma_{\text{Мизес}}$  — напряжение по Мизесу. Второе, с резким снижением несущей способности трубопровода, обусловленным образованием пластического шарнира или местной потерей устойчивости (гофрообразованием):  $\varepsilon_b = \varepsilon_{\text{Mmax}}$  или  $\varepsilon_{ac} = \varepsilon_w$ , где  $\varepsilon_b$  — деформация изгиба трубы;  $\varepsilon_{ac}$  — осевая (фибровая) деформация сжатия;  $\varepsilon_{\text{Mmax}}$  — деформация, соответствующая максимуму на кривой «момент — деформация»;  $\varepsilon_w$  — деформация сжатия, при которой начинается гофрообразование.

Предельные состояния для рассматриваемого газопровода  $720 \times 14$  изображены на рис. 6, причём штриховая линия соответствует предельному состоянию типа I, а сплошная — состоянию типа II. Если оценивать работоспособность рассматриваемого газопровода по критерию типа II, то видно, что наиболее опасными для него являются бугры пучения длиной 3,8 м, причём бугры меньшей длины сминаются трубопроводом до наступления в нём предельного состояния типа II, и поэтому они вообще не представляют какой-либо опасности вне зависимости от высоты бугра.

Для решения задачи статистической динамики используется метод интерполяционных полиномов. В качестве случайных входных данных выбираются две величины  $H_0$  и  $\lambda_0$ . Их числовые характеристики приняты следующими:  $\langle H_0 \rangle = 0,15$  м;  $\langle \lambda_0 \rangle = 5$  м;  $S_H = 0,2\langle H_0 \rangle$ ;  $S_\lambda = 0,2\langle \lambda_0 \rangle$ . Выходными случайными величинами здесь являются  $\sigma_{\text{Мизес}}$ ,  $\varepsilon_b$  и  $\varepsilon_{ac}$ .

Для оценки показателей безопасности и риска рассматриваемой конструкции используется теория, предложенная В. В. Болотиным:

$$B(t) = \exp[-\lambda t(1 - B(\Phi))],$$

где  $B(t)$  — функция безопасности;  $\lambda$  — математическое ожидание числа бугров пучения в единицу времени;  $B(\Phi)$  — условная безопасность, определяемая как  $B_I(\Phi) = P\{\sigma_{\text{Мизес}} < \sigma_{0,2}\}$  или  $B_{II}(\Phi) = \min(P\{\varepsilon_b < \varepsilon_{\text{Мmax}}\}, P\{|\varepsilon_{ac}| < |\varepsilon_w|\})$ .

Входящие в эти выражения вероятности легко находятся с помощью функций распределения соответствующих выходных параметров.

Как показывают результаты расчётов, для рассматриваемого газопровода со сроком службы  $T = 40$  лет безопасность по критерию I составляет лишь 0,078, а по критерию II безопасность равна 0,972.

В результате проведённых исследований решена научно-техническая задача, имеющая важное практическое значение благодаря созданию, развитию и совершенствованию научных методов расчёта и анализа показателей надёжности трубопроводных систем.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Болотин В. В. Методы теории вероятностей и теории надёжности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат, 1982. 351 с. [Bolotin V. V. Methods of the probability theory and reliability theory in structural design. Moscow: Stroyizdat, 1982. 351 pp.]
2. Перов С. Н., Скворцов Ю. В., Цапурин К. А. Конечно-элементное моделирование полuellиптической трещины и вычисление параметров механики разрушения. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2006. 24 с. (Деп. В ВИНТИ № 218-B2006 от 02.03.2006) [Perov S. N., Skvortsov Yu. V., Tsapurin K. A. Finite element simulation of semi-elliptical crack and calculation of parameters of fracture mechanics. Samara: Samara State Aerospace Univ., 2006. 24 pp. (Deposited at VINITI 02.03.2006, No. 218-B2006.)]
3. Перов С. Н., Скворцов Ю. В., Цапурин К. А. Коэффициенты интенсивности напряжений для труб с несквозными трещинами // Известия Самарского научного центра РАН, 2008. Т. 10, № 3. С. 905–910. [Perov S. N., Skvortsov Yu. V., Tsapurin K. A. Stress intensity factors for the pipes with the nonthrough cracks // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN, 2008. Vol. 10, no. 3. Pp. 905–910].
4. Перов С. Н., Скворцов Ю. В., Цапурин К. А. Решение задачи статистической динамики для магистрального нефтепровода // Вестник СГАУ, 2006. № 1. С. 187–193. [Perov S. N., Skvortsov Yu. V., Tsapurin K. A. Solution of statistical dynamics problem for the main oil pipeline // Vestnik SGAU, 2006. no. 1. Pp. 187–193].
5. Перов С. Н., Скворцов Ю. В., Цапурин К. А. Оценка надёжности трубопроводных систем с трещинами методами интерполяционных полиномов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2010. Т. 76, № 5. С. 49–52. [Perov S. N., Skvortsov Yu. V., Tsapurin K. A. Evaluation of the reliability of pipeline systems with cracks by the method of interpolation polynomials // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov, 2010. Vol. 76, no. 5. Pp. 49–52].
6. Цапурин К. А., Скворцов Ю. В., Глушков С. В. Оценка показателей прочности и надёжности подземной трубопроводной системы // Известия Самарского научного центра РАН, 2011. Т. 13, № 4(4). С. 1168–1171. [Tsapurin K. A., Skvortsov Yu. V., Glushkov S. V. Estimation of indexes of durability and reliability of underground pipeline system // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN, 2011. Vol. 13, no. 4(4). Pp. 1168–1171].
7. Попов Н. Н., Павлова Г. А., Шершнева М. В. Оценка надёжности стержневых элементов конструкций из стохастически неоднородного разупрочнённого материала в условиях ползучести на основе параметрического критерия отказа // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки, 2010. № 5(21). С. 117–124. [Popov N. N.,

- Pavlova G. A., Shershneva M. V.* Reliability Estimation of Stochastic Heterogeneous Rod Constructional Elements by the Use of Parametric Failure Criterion // *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki*, 2010. no. 5(21). Pp. 117–124].
8. *Радченко В. П., Кубышкина С. Н., Шершнева М. В.* Оценка надёжности элементов конструкций в условиях ползучести на основании стохастических обобщённых моделей // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2012. № 3(28). С. 53–71. [*Radchenko V. P., Shershneva M. V., Kubysheva S. N.* Evaluation of the reliability of structures under creep for stochastic generalized models // *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki*, 2012. no. 3(28). Pp. 53–71].
  9. *Попов Н. Н., Радченко В. П.* Аналитическое решение стохастической краевой задачи установившейся ползучести для толстостенной трубы // *ПММ*, 2012. Т. 76, № 6. С. 1036–1044. [*Popov N. N., Radchenko V. P.* Analytical solution of the stochastic boundary-value problem of steady-state creep for a thick-walled tube // *Prikl. Mat. Mekh.*, 2012. Vol. 76, no. 6. Pp. 1036–1044].
  10. *Должковой А. А., Попов Н. Н., Радченко В. П.* Решение стохастической краевой задачи установившейся ползучести для толстостенной трубы методом малого параметра // *ПМТФ*, 2006. Т. 47, № 1. С. 160–171; англ. пер.: *Dolzhkovoii A. A., Popov N. N., Radchenko V. P.* Solution of the stochastic boundary-value problem of steady-state creep for a thick-walled tube using the small-parameter method // *J. Appl. Mech. Tech, Phys.*, 2006. Vol. 47, no. 1. Pp. 134–142.

Поступила в редакцию 20/VII/2012;  
в окончательном варианте — 27/XI/2012.

MSC: 74S60; 74R20

## THE RELIABILITY INDICATORS CALCULATION FOR THE PIPELINE SYSTEMS WITH CRACK-LIKE DEFECTS AND COMPLICATED SERVICE CONDITIONS

***K. A. Tsapurin***

Al'yans Limited Liability Company,  
101, Prospekt Mira, Moscow, 129085, Russia.

E-mail: [tsapurin@list.ru](mailto:tsapurin@list.ru)

*The existing methods for pipeline systems reliability estimation, based on a normative approach, do not consider in an explicit form neither time as a factor, nor the probability nature of characteristics of load-carrying ability and loads that often leads to designation of unfairly high values for stress reserve factors. Methods based on probability approaches allow excluding these shortcomings, however, in spite of the fact that they are rather widely theoretically justified, their practical applications do not exceed 1 %. In this paper the algorithms and methods for pipeline systems reliability indicators calculation for practical application which allow determining the values during design or service stage are presented. These methods are based on the theory of classical statistics.*

**Key words:** *pipeline, crack-like defects, method of interpolation polynomials, non-canonical decomposition, stress intensity factor, statistical dynamics problem, reliability function.*

Original article submitted 20/VII/2012;  
revision submitted 27/XI/2012.