УДК 539.376

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ НЕСООСНОЙ ТРУБЫ НА ОСНОВЕ ПРИБЛИЖЕННОГО АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ

© 2026 А.Д. Москалик, В.Н. Горелов

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 09.02.2026

В статье рассмотрена проблема надежности работы толстостенной несоосной трубы под внутренним давлением в условиях установившейся ползучести. Предложена методика определения долговечности трубы на основе приближенного аналитического решения краевой задачи методом возмущений до второго порядка включительно при стохастической величине малого параметра с нормальным распределением и применением метода статистических испытаний. Надежность работы трубы оценивается по деформационному критерию отказа, связывающему предельное состояние с достижением критического радиального перемещения стенки трубы. Методика позволяет проводить параметрический анализ долговечности трубы в зависимости от нелинейных характеристик материала при ползучести, уровня давления в трубе, доверительной вероятности работоспособности трубы. Полученные доверительные интервалы для времени отказа дают практический инструмент для обоснования ресурса конструкций в условиях ползучести с учетом разброса геометрических параметров.

Ключевые слова: толстостенная несоосная труба, метод возмущений, установившаяся ползучесть, стохастическая величина малого параметра, деформационный критерий отказа.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2(2)-402-407
EDN: CHKEJJ

Обеспечение надежности работы элементов конструкций является одной из основных задач, стоящих в нелинейной механике и, в частности, в теории ползучести. В основном в задачах теории установившейся ползучести рассматриваются так называемые внутренние стохастические задачи, когда границы области фиксированы, а случайными полагаются свойства материала, т.е. рассматриваются стохастические уравнения состояния. Решения для такого рода задач подробно рассмотрены в работах Радченко В.П. с соавторами [1-4] и других [5-7]. Так, в исследовании [6] в качестве стохастических величин приняты напряжение и температура, начальное повреждение, а также свойства материала. Успешное использование метода статистических испытаний (Монте-Карло) приведено в работах [8-9].

Класс внешних стохастических краевых задач (со стохастически возмущенными границами элемента конструкции) в задачах ползучести практически не исследован.

В данной статье рассматривается методика прогнозирования долговечности несоосной толстостенной трубы, находящейся под внутренним давлением q в условиях плоского деформированного состояния (рис. 1), основанная на использовании приближенного аналитического решения методом возмущений краевой задачи установившейся ползучести со степенным законом ползучести

$$\varepsilon_{ij} = \frac{3}{2} A \sigma_e^{n-1} S_{ij}, \qquad (1)$$

где n, A – постоянные характеристики материала, σ_e – интенсивность напряжений, S_{ij} – девиатор напряжений.

Приведем кратко постановку задачи и решения для нулевого, первого и второго приближения задачи в полярных координатах r, θ.

В качестве малого параметра принимается величина несоосности трубы δ. Разложение тензоров напряжений, скоростей деформаций и скоростей перемещений имеет вид:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{(0)} + \tilde{\delta}\sigma_{ij}^{(1)} + \tilde{\delta}^2\sigma_{ij}^{(2)},$$
$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^{(0)} + \tilde{\delta}\dot{\varepsilon}_{ij}^{(1)} + \tilde{\delta}^2\dot{\varepsilon}_{ij}^{(2)}, \qquad (2)$$
$$\dot{u}_i = \dot{u}_i^{(0)} + \tilde{\delta}\dot{u}_i^{(1)} + \tilde{\delta}^2\dot{u}_i^{(2)},$$

где 0, 1, 2 – значения, указывающие порядок приближения: нулевой, первый и второй соот-

Рисунок 1. Несоосная труба:
1 – внутренний контур трубы; 2 – внешний контур трубы;
3 – внешний контур трубы для осесимметричного случая

Москалик Анна Давидовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Механика». E-mail: annamoskalik@yandex.ru
Горелов Владимир Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика». E-mail: gorelow67@mail.ru

ветственно. В постановке задачи используются условие несжимаемости материала для скоростей деформаций ползучести: $\dot{\varepsilon}_{rr} + \dot{\varepsilon}_{\theta\theta} = 0$ и соотношения Коши

$$\dot{\varepsilon}_{rr}^{(k)} = \frac{\partial \dot{u}_r^{(k)}}{\partial r},\ \dot{\varepsilon}_{\theta\theta}^{(k)} = \frac{1}{r}\frac{\partial \dot{u}_\theta^{(k)}}{\partial \theta} + \frac{\dot{u}_r^{(k)}}{r},\ \dot{\varepsilon}_{r\theta}^{(k)} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial \dot{u}_r^{(k)}}{\partial \theta} + \frac{\partial \dot{u}_\theta^{(k)}}{\partial r} - \frac{\dot{u}_\theta^{(k)}}{r}\right). \quad (3)$$

Граничное условие на внешнем возмущенном контуре трубы имеет вид:

$$r = b + \delta\cos\theta + \delta^2(\cos 2\theta - 1)/4b. \quad (4)$$

Решение для нулевого приближения описано в монографии Ю.Н. Работнова [8]:

$$\sigma_{rr}^{(0)} = \sigma_{rr}^{(0)}(r), \sigma_{\theta\theta}^{(0)} = \sigma_{\theta\theta}^{(0)}(r), u_{rr}^{(0)} = u_{rr}^{(0)}(r) \quad (5)$$

и зависит только от радиуса r; решение для первого и второго приближения приведено в статье [9] в виде

$$\sigma_{rr}^{(1)} = \rho_{rr}^{(1)}(r)\cos\theta,\ \ \sigma_{\theta\theta}^{(1)} = \rho_{\theta\theta}^{(1)}(r)\cos\theta,\ \ \sigma_{r\theta}^{(2)}(r,\theta) = \rho_{r\theta}^{(2)}(r)\sin\theta;$$

$$\dot{u}_r^{(1)}(r,\theta) = \dot{u}_r^{\rho}(r)\cos\theta,\ \ \dot{u}_\theta^{(1)}(r,\theta) = \dot{u}_\theta^{\rho}(r)\sin\theta. \quad (6)$$

$$\sigma_{rr}^{(2)}(r,\theta) = \rho_{rr}^{(2)}(r)\cos 2\theta + \psi_{rr}^{(2)}(r); \sigma_{\theta\theta}^{(2)}(r,\theta) = \rho_{\theta\theta}^{(2)}(r)\cos 2\theta + \psi_{\theta\theta}^{(2)}(r);$$

$$\sigma_{r\theta}^{(2)}(r,\theta) = \rho_{r\theta}^{(2)}(r)\sin 2\theta;\ \dot{u}_r^{(2)}(r,\theta) = \dot{u}_r^{\psi}(r) + \dot{u}_r^{\rho}(r)\cos 2\theta;\ \ \dot{u}_\theta^{(2)}(r,\theta) = \dot{u}_\theta^{\rho}(r)\sin 2\theta.$$

Здесь $\rho_{\theta\theta}^{(1)}(r)$, $\rho_{rr}^{(1)}(r)$, $\rho_{r\theta}^{(1)}(r)$, $\rho_{\theta\theta}^{(2)}(r)$, $\rho_{rr}^{(2)}(r)$, $\psi_{rr}^{(2)}(r)$; $\rho_{r\theta}^{(2)}(r)$ – известные функции радиуса r. Решения для первого и второго приближения зависят помимо радиуса r и от тригонометрической функции угла θ.

Рассмотрим стохастическую постановку указанной задачи, где случайной величиной является малый параметр δ, имеющий нормальный закон распределения и определяющий величину несоосности толстостенной трубы (рис. 1). Одним из методов решения задач в стохастической постановке является метод статистических испытаний.

Используем деформационный критерий отказа работоспособности трубы, при котором изделие выходит из строя, если хотя бы в одной его точке какая-либо компонента вектора перемещений достигает некоторого заданного значения u^*, т.е. труба выходит из строя при выполнении условия

$$u(t) \geqslant u^*, \quad (7)$$

где $u(t)$ – интересующая нас компонента вектора перемещений в заданной точке.

Применительно к задаче о несоосной трубе в (7) под $u(t)$ будем понимать радиальное перемещение в заданной точке внешнего контура. Основной количественной характеристикой надежности элемента конструкции является вероятность того, что во всех точках элемента конструкции выполняется условие работоспособности $u(t) < u^*$. Функция надежности $P(t)$, описывающая вероятность безотказной работы на отрезке $[0, t]$, является вероятностью того, что случайная функция $u(t)$ принимает значения в интервале $(0, u^*)$ на этом отрезке времени [10]:

$$P(t) = P\{u(t) \in (0, u^*)\}.$$

При построении вероятностных характеристик используем приближенное аналитическое решение методом возмущений до второго порядка приближения включительно. Приведем алгоритм решения внешней стохастической краевой задачи:

1. определяется закон плотности распределения случайной величины δ, если имеется соответствующая статистическая информация, либо он постулируется, как в модельной задаче;

2. исходя из выбранного закона распределения (в настоящей задаче это нормальный закон) генерируется выборка значений случайной величины δ;

3. определяются точки на внешнем контуре несоосной трубы, в которых скорость деформации ползучести $\dot{\varepsilon}_{\theta\theta}$ имеет максимальное значение, что выполняется для точек при $\theta = \pi$, причем здесь $\dot{u}_\theta = 0$, а, следовательно, из соотношений Коши (3) получаем

$$\dot{u}_r = \dot{\varepsilon}_{\theta\theta} r \quad \Rightarrow \quad u_r = \dot{\varepsilon}_{\theta\theta} r t \quad (8)$$

для любого r (при $\theta = \pi$), поскольку на стадии установившейся ползучести $\dot{\varepsilon}_{\theta\theta}$ = const;

4. для каждого случайного значения величины δ определяется величина $u_r = u_r(t)$ с использованием (8), соотношения (1) для компоненты $\dot{\varepsilon}_{\theta\theta}$ для каждого приближения и приближенных решений для компонент тензора напряжений (5-6).

5. для конкретной заданной критической величины перемещения u_r^*: $u_r = u_r^*$ (при $\theta = \pi$, $r = b + \delta\cos\theta + \delta^2(\cos 2\theta - 1)/4b$) определяются моменты времени t^*, при которых радиальное перемещение достигает критического значения u_r^*;

6. расчетные значения времени t^* образуют статистическую выборку случайной величины времени отказа, для которой можно определить характеристики этой выборки: математическое ожидание, дисперсию, среднее квадратичное отклонение, доверительный интервал и т.д.

Для иллюстрации применения метода статистических испытаний рассмотрим модельную трубу с внутренним радиусом a = 115 мм и возмущенным на малую величину δ внешним радиусом b = 150 мм, находящуюся под внутренним давлением. В расчетах используется безразмерная величина $\tilde{\delta} = \delta/a$. В статье [11] показано, что значение $\tilde{\delta} = 0{,}03$ соответствует величине разностенности трубы 10%, что является практически предельно допустимым по ГОСТ 8732–78 [12], поэтому используем данное значение в качестве математического ожидания m_δ = 0,03, для среднего квадратического отклонения в дальнейших модельных расчетах будем использовать величину σ_δ = 0,009.

Для моделирования статистических данных в дальнейших расчетах сгенерировано 30 значений $\tilde{\delta}$ (h = 30). и далее при каждом $\tilde{\delta}$ рассчитывается функция $u_r = u_r(t)$ по (6) с учетом приближенных аналитических решений для компонент тензора напряжений σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$ и $\sigma_{r\theta}$, которые используются для расчета $\dot{\varepsilon}_{\theta\theta}$.

Проиллюстрируем детально изложенную выше методику на двух модельных задачах для толстостенной трубы:

- из углеродистой стали при параметрах нелинейности n = 3,03, A = 9,04·10^{-9} МПа$^{-n}$ ч$^{-1}$, находящейся под внутренним давлением q = 10 МПа, для которой зададим критическое перемещение u_r^* = 0,0522·a = 6 мм, что составляет 2% от наружного диаметра трубы;

- из сплава ЭИ698 при параметрах нелинейности n = 10,96, A = 4,57·10^{-33} Мпа$^{-n}$ ч$^{-1}$, находящейся под внутренним давлением q = 60 МПа, для которой зададим критическое перемещение u_r^* = 0,0261, a = 3 мм, что составляет 1% от наружного диаметра трубы.

Графики зависимости перемещения $u_r(t)$ от времени для каждого значения малого параметра $\tilde{\delta}$ приведены на рис. 2 и 3.

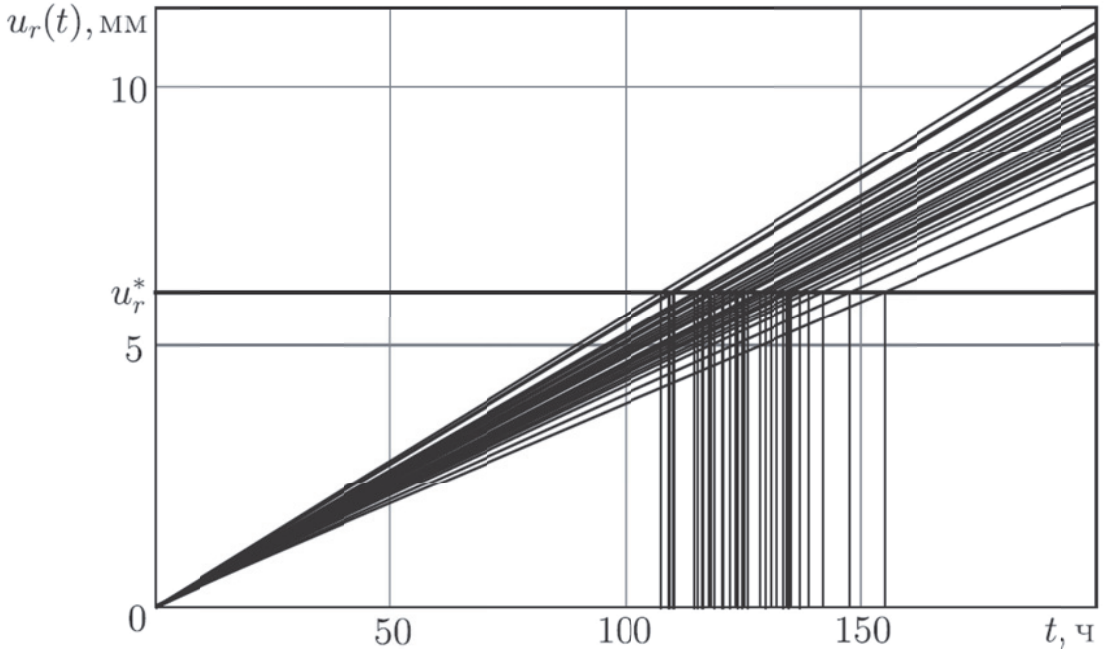

Рис. 2. Выборка радиальных перемещений $u_r(t)$ при m_δ = 0,03 и σ_δ = 0,009 для трубы из углеродистой стали

При решении каждой из 30 детерминированных задач установившейся ползучести определяется критическое время отказа t^* для трубы из углеродистой стали и сплава ЭИ698, т.е. решается уравнение $u_r(t^*) = u_r^*$. Для значений m_δ = 0,03 и σ_δ = 0,009 время отказа t^* для каждой реализации приведено в табл. 1.

Для выборки из 30 критических времен t_i^* определяются статистические характеристики. Для этого в качестве оценки для математического ожидания $\tilde{m}_t$ используется среднее арифметическое полученных значений критического времени t_i^*: $\tilde{m}_t = \frac{\sum_i^{30} t_i^*}{30}$. Несмещенная оценка для дисперсии математического ожидания дискретной случайной величины имеет вид: $\tilde{D}_t = \frac{\sum_i^{30}(t_i^* - \tilde{m}_t)^2}{29}$, среднее квадратическое отклонение: $\sigma_{\tilde{m}_t} = \sqrt{\tilde{D}_t/30}$.

Определим границы доверительного интервала I_β для математического ожидания при доверительной вероятности β= 0,95 и β = 0,9973 для двух рассмотренных выше модельных труб, предполагая нормальный закон для времени отказа

Таблица 1. Выборка $\tilde{\delta}_i$ и время t^* достижения критического значения $u_r(t_i^*) = u_i^*$ для углеродистой стали и сплава ЭИ698 при $m_\delta = 0{,}03$ и $\sigma_\delta = 0{,}009$

№ п/п, i	$\tilde{\delta}_i$	t_i^*, ч $n = 3{,}03$	$t_i^* \cdot 10^5$, ч $n = 10{,}96$	№ п/п, i	$\tilde{\delta}_i$	t_i^*, ч $n = 3{,}03$	$t_i^* \cdot 10^5$, ч $n = 10{,}96$
1	0,0415	109,53	1,27	16	0,0307	122,91	1,71
2	0,0343	118,27	1,55	17	0,0319	121,34	1,65
3	0,0074	161,60	3,78	18	0,0235	133,18	2,14
4	0,0377	114,02	1,41	19	0,0362	115,90	1,47
5	0,0202	138,10	2,38	20	0,0267	128,59	1,94
6	0,0365	115,55	1,46	21	0,0227	134,24	2,19
7	0,0297	124,27	1,76	22	0,0351	117,31	1,51
8	0,0420	109,00	2,16	23	0,0369	117,47	1,44
9	0,0183	141,03	2,54	24	0,0214	136,27	2,29
10	0,0258	129,80	1,99	25	0,0309	122,72	1,71
11	0,0236	132,97	2,13	26	0,0247	131,35	2,06
12	0,0292	124,97	1,79	27	0,0374	114,42	1,42
13	0,0415	109,46	1,27	28	0,0437	106,98	1,21
14	0,0148	146,70	2,87	29	0,0273	127,47	1,90
15	0,0329	120,00	1,61	30	0,0232	133,53	2,16

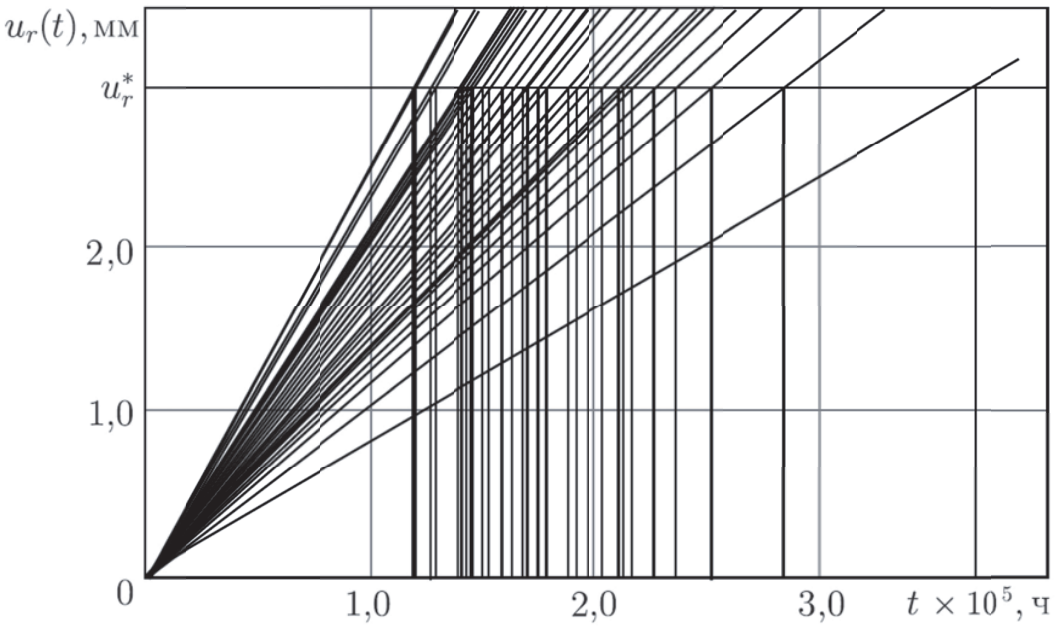

Рис. 3. Выборка радиальных перемещений $u_r(t)$ при $m_\delta = 0{,}03$ и $\sigma_\delta = 0{,}009$ для трубы из сплава ЭИ698

$$I_\beta = (\tilde{m}_t - t_\beta \sigma_{\tilde{m}_t}, \tilde{m}_t + t_\beta \sigma_{\tilde{m}_t}),$$

где t_β – количество средних квадратических отклонений $\sigma_{\tilde{m}_t}$, которое необходимо отложить от центра рассеивания (т.е. математического ожидания), чтобы достичь вероятности β. В результате

проведенных расчетов в табл. 2 показаны значения вероятностей и доверительные интервалы для математического ожидания времени отказа m_t = 125,3 ч для углеродистой стали и математического ожидания времени отказа $m_t = 1{,}87 \cdot 10^5$ ч для сплава ЭИ698 при заданном значении математического ожидания малого параметра m_δ = 0,03 и σ_δ = 0,009. Нижняя граница доверительного интервала времени отказа и определяет время безотказной работы элемента конструкции с соответствующей вероятностью.

Таблица 2. Доверительные интервалы времени отказа t^* при m_δ = 0,03 и σ_δ = 0,09 для труб из углеродистой стали и сплава ЭИ698 безотказной работы элемента конструкции с соответствующей вероятностью

β	t_β	Труба из углеродистой стали, I_β, ч	Труба из сплава ЭИ698, I_β, ч
0,95	1,96	(120,88; 129,71)	$(1{,}66 \cdot 10^5; 2{,}07 \cdot 10^5)$
0,9973	3,0	(118,54; 132,05)	$(1{,}56 \cdot 10^5; 2{,}18 \cdot 10^5)$

Таким образом, для двух данных модельных задач время отказа по деформационному критерию отказа для трубы из углеродистой стали составляет t^* = 120,88 ч при доверительной вероятности β = 0,95 и t^* = 118,54 ч при β = 0,9973 (трехсигмовый интервал), а для трубы из сплава ЭИ896 эти величины соответственно $t^* = 1{,}66 \cdot 10^5$ ч при β = 0,95 и $t^* = 1{,}56 \cdot 10^5$ ч при β = 0,9973.

ВЫВОДЫ

Разработана методика расчета на надежность толстостенной трубы с возмущенным внешним контуром, находящейся под внутренним давлением, при установившейся ползучести, по деформационному критерию отказа с использованием приближенного аналитического решения задачи о несоосной толстостенной трубе методом возмущений до второго порядка приближения включительно.

Выполнен вариативный параметрический анализ оценки надежности несоосной толстостенной трубы с возмущенными границами в зависимости от показателя нелинейности установившейся ползучести, различной величины предельно допустимого перемещения, различной доверительной вероятности, разных внутренних давлениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Должковой, А. А.* Решение стохастической краевой задачи установившейся ползучести для толстостенной трубы методом малого параметра / А. А. Должковой, Н. Н. Попов, В. П. Радченко // ПМТФ. – 2006. – Т. 47. – № 1. – С. 161-171.
2. *Коваленко, Л. В.* Решение плоской стохастической краевой задачи ползучести / Л. В. Коваленко, Н. Н. Попов, В. П. Радченко // ПММ. – 2009. – Т. 73. – № 6. – С. 1009-1016.
3. *Радченко, В. П.* Аналитическое решение стохастической краевой задачи установившейся ползучести для толстостенной трубы / В. П. Радченко, Н. Н. Попов // ПММ. – 2012. – Т.76. – № 6. – С. 1023-1031.
4. *Радченко, В. П.* Решение стохастических краевых задач для толстостенной трубы из микронеоднородного материала в условиях ползучести методом Монте-Карло / В. П. Радченко, В. Н. Исуткина, А. Ю. Маргаритов // СамДиф-2007: Труды Всеросс. Конф. «Дифференциальные уравнения и их приложения» (Самара, 29 января–2 февраля 2007 г.). – Самара: Изд-во Универсгрупп, 2007. – С. 96-97.
5. *Zhou C., Tu S.* A stochastic computation model for the creep damage of furnace tube // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. 2001. no. 78. P. 617-625.
6. *Md Abir Hossain, C. M.* Stewart A probabilistic creep model incorporating test condition, initial damage, and material property uncertainty. International Journal of Pressure Vessels and Piping V. 193, Oct. 2021. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104446
7. *Harlow D. G., Delph T. J.* A computational probabilistic model for creep-damaging solids // Computers & Structures. – 1995. V. 54, no. 1. P. 161-166.
8. *Бадаев, А. Н.* Стохастическое прогнозирование ползучести жаропрочных сплавов с использованием метода Монте-Карло / А. Н. Бадаев // Проблемы прочности. – 1985. – № 2. – С. 7-10.
9. *Соснин, О. В.* Энергетический вариант теории ползучести / О. В. Соснин, Б. В. Горев, А. Ф. Никитенко. – Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1986. – 95 с.
10. *Работнов, Ю.Н.* Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1979. – 744 с.
11. *Москалик, А. Д.* Применение метода возмущений к задаче о несоосной трубе в условиях установившейся ползучести / А. Д. Москалик // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2013. – № 4(33). – С. 76-85.

12. *Болотин, В. В.* Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В. В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
13. *Москалик, А. Д.* Аналитическое решение краевой задачи установившейся ползучести несоосной толстостенной трубы под действием внутреннего давления методом малого параметра до третьего порядка приближения / А. Д. Москалик, В. П. Радченко // Прикладная математика и механика. – 2019. – Т. 83. – № 1. – С. 144-157.
14. ГОСТ 8732-78 (СТ СЭВ 1481-78). Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. – М.: ИПК Изд-во Стандартов, 1998. – 10 с.

PREDICTING THE LIFETIME OF A MISAL-CORRECT PIPE BASED ON AN APPROXIMATE ANALYTICAL SOLUTION UNDER CREEP CONDITIONS

© 2026 A.D. Moskalik, V.N. Gorelov

Samara State Technical University, Samara, Russia

The article addresses the problem of reliability of a thick-walled noncoaxial tube under internal pressure under steady-state creep conditions. A method for determining tube durability is proposed based on the approximate analytical solution of the boundary value problem using the method of perturbations up to the second order, with a stochastic small parameter following a normal distribution, and employing the statistical trial method. The tube's operational reliability is assessed according to a deformation-based failure criterion, which links the limit state to reaching a critical radial displacement of the tube wall. The proposed method allows for parametric analysis of tube durability depending on the nonlinear creep characteristics of the material, pressure levels, and the confidence level of tube operability. The obtained confidence intervals for failure time provide a practical tool for justifying the service life of structures under creep conditions, accounting for the dispersion of geometric parameters.
Key words: thick-walled non-coaxial tube, perturbation method, steady-state creep, stochastic value of the small parameter, deformation failure criterion.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2(2)-402-407
EDN: CHKEJJ

REFERENCES

1. *Dolzhkovoj, A. A.* Reshenie stohasticheskoj kraevoj zadachi ustanovivshejsya polzuchesti dlya tolstostennoj truby metodom malogo parametra / A. A. Dolzhkovoj, N. N. Popov, V. P. Radchenko // PMTF. – 2006. – T. 47. – № 1. – S. 161-171.
2. *Kovalenko, L. V.* Reshenie ploskoj stohasticheskoj kraevoj zadachi polzuchesti / L. V. Kovalenko, N. N. Popov, V. P. Radchenko // PMM. – 2009. – T. 73. – № 6. – S. 1009-1016.
3. *Radchenko, V. P.* Analiticheskoe reshenie stohasticheskoj kraevoj zadachi ustanovivshejsya polzuchesti dlya tolstostennoj truby / V. P. Radchenko, N. N. Popov // PMM. – 2012. – T.76. – № 6. – S. 1023-1031.
4. *Radchenko, V. P.* Reshenie stohasticheskih kraevyh zadach dlya tolstostennoj truby iz mikroneodnorodnogo materiala v usloviyah polzuchesti metodom Monte-Karlo / V. P. Radchenko, V. N. Isutkina, A. Yu. Margaritov // SamDif-2007: Trudy Vseross. Konf. «Differencial'nye uravneniya i ih prilozheniya» (Samara, 29 yanvarya–2 fevralya 2007 g.). – Samara: Izd-vo Universgrupp, 2007. – S. 96-97.
5. *Zhou C., Tu S.* A stochastic computation model for the creep damage of furnace tube // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. 2001. no. 78. P. 617-625.
6. *Md Abir Hossain, C. M.* Stewart A probabilistic creep model incorporating test condition, initial damage, and material property uncertainty. International Journal of Pressure Vessels and Piping V. 193, Oct. 2021. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104446
7. *Harlow D. G., Delph T. J.* A computational probabilistic model for creep-damaging solids // Computers & Structures. – 1995. V. 54, no. 1. P. 161-166.
8. *Badaev, A. N.* Stohasticheskoe prognozirovanie polzuchesti zharoprochnyh splavov s ispol'zovaniem metoda Monte-Karlo / A. N. Badaev // Problemy prochnosti. – 1985. – № 2. – S. 7-10.
9. *Sosnin, O. V.* Energeticheskij variant teorii polzuchesti / O. V. Sosnin, B. V. Gorev, A. F. Nikitenko. – Novosibirsk: In-t gidrodinamiki SO AN SSSR, 1986. – 95 s.
10. *Rabotnov, Yu.N.* Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela / Yu.N. Rabotnov. – M.: Nauka, 1979. – 744 s.
11. *Moskalik, A. D.* Primenenie metoda vozmushchenij k zadache o nesoosnoj trube v usloviyah ustanovivshejsya polzuchesti / A. D. Moskalik // Vestn. Sam. gos. tekhn. un-ta. Ser. Fiz.-mat. nauki. – 2013. – № 4(33). – S. 76-85.
12. *Bolotin, V. V.* Prognozirovanie resursa mashin i konstrukcij / V. V. Bolotin. – M.: Mashinostroenie, 1984. – 312 s.
13. *Moskalik, A. D.* Analiticheskoe reshenie kraevoj zadachi ustanovivshejsya polzuchesti nesoosnoj tolstostennoj truby pod dejstviem vnutrennego davleniya metodom malogo parametra do tret'ego poryadka priblizheniya / A. D. Moskalik, V. P. Radchenko // Prikladnaya matematika i mekhanika. – 2019. – T. 83. – № 1. – S. 144-157.
14. GOST 8732-78 (ST SEV 1481-78). Truby stal'nye besshovnye goryachedeformirovannye. – M.: IPK Izd-vo Standartov, 1998. – 10 s.

Anna Moskalik, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor in the Department of Mechanics.
E-mail: annamoskalik@yandex.ru
Vladimir Gorelov, PhD in Engineering, Associate Professor in the Department of Mechanics. E-mail: gorelow67@mail.ru