

# ВОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 628.2-62-192

doi: 10.23968/2305-3488.2019.24.3.3-8

## ПРИБЛИЖЕННАЯ АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СТАРЕЮЩИХ ОБЪЕКТОВ ВКХ

Алексеев М. И., Баранов Л. А., Ермолин Ю. А.

## APPROXIMATE ANALYTICAL ESTIMATE OF RELIABILITY INDICES FOR AGEING FACILITIES OF WATER SUPPLY AND SEWER SYSTEMS

Alexeev M. I., Baranov L. A., Ermolin Y. A.

### Аннотация

**Введение.** В статье обсуждаются особенности методических подходов к решению инженерных задач надежности «стареющих» объектов водопроводно-канализационного хозяйства крупного города. Отмечается, что для объектов, находящихся в эксплуатации длительное время, известные методики решения практических задач неприменимы из-за нестационарности (в смысле надежности) таких объектов. Это вызывает необходимость разработки приближенных методик оценки показателей надежности стареющих объектов. **Методы.** Производится формальная замена реального нестационарного (стареющего) объекта его виртуальным стационарным аналогом с постоянным значением интенсивности отказов. Это значение находится из условия равенства функций надежности реального и виртуального объектов при некотором времени эксплуатации. В качестве такой точки на временной оси выбирается значение среднего времени наработки до отказа виртуального объекта. Полученное таким образом уравнение решается относительно искомой переменной, которая в результате выражается через параметры «закона старения» реального нестационарного объекта. Погрешность, допускаемая при такой аппроксимации, аналитически оценивается для случая линейно-стареющего объекта. Показано, что при реальном сочетании параметров «закона старения» эта погрешность не превышает 4–5 %, что вполне приемлемо при проведении инженерных расчетов. **Результаты.** Разработан метод приближенной стационаризации характеристик надежности нестационарного объекта, параметр потока отказов которого выражается через коэффициенты функции надежности реального стареющего объекта. Это открывает возможность использования при анализе надежности нестационарных объектов хорошо разработанные методики решения подобных задач для стационарных (в смысле надежности) объектов. **Заключение.** Предложенная процедура приближенной оценки основных показателей надежности нестационарных объектов удобна для применения на практике.

**Ключевые слова:** надежность, стареющий объект, показатель надежности, аппроксимация, стационаризация, погрешность.

### Abstract

**Introduction.** The paper addresses characteristic features of methodological approaches to solving engineering reliability problems associated with aging facilities of water supply and sewer systems in large cities. It is noted that, in case of long-lived facilities, well-known procedures for solving practical tasks are not applicable due to non-stationarity (in terms of reliability) of such facilities. **Methods.** A real non-stationary (“aging”) facility (object) is formally replaced by its virtual stationary analog with a constant failure rate, which can be determined based on the condition of equality between reliability functions of those real and virtual objects for a particular operating time. Mean operating time to failure of the virtual object is chosen as such point on the time-axis. A corresponding equation is obtained and solved for the unknown variable that, as a result, can be expressed in terms of “aging law” for a real non-stationary object. An approximation error is estimated analytically for a linearly aging object. It is demonstrated that in case of a real combination of “aging law” parameters, this error does not exceed 4–5%, which is quite acceptable for engineering calculations. **Results.** The authors develop a procedure for the approximate substitution of a non-stationary object by a stationary one (stationarization) where the failure flow is expressed in terms of reliability function coefficients of a real aging object. This procedure makes it possible to use well-known methods of solving reliability problems of stationary objects when analyzing non-stationary objects. **Conclusion.** The proposed procedure of approximate estimate for basic reliability indices of non-stationary objects is convenient for practical use.

**Keywords:** reliability, aging object, reliability index, approximation, stationarization, error.

## Введение

Теория надежности используется на всех этапах создания и эксплуатации как отдельных объектов, так и всей инфраструктуры водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ) крупных городов. Так, еще на стадии проектирования объекта в его конструкцию должны быть «заложены» такие, например, свойства, как долговечность и ремонтпригодность, гарантированно обеспечивающие нормальную работоспособность устройства (системы) в течение назначаемого срока службы.

Важную роль теория надежности приобретает при разработке комплекса мероприятий по техническому обслуживанию уже действующих объектов и систем ВКХ, поддерживающих требуемый уровень эффективности их функционирования [1, 8, 16]. Корректная математическая постановка и решение соответствующих надежностных задач, базирующихся на информации о текущем состоянии объекта, могут дать научно-обоснованные рекомендации относительно: периодичности технических осмотров и профилактических ремонтов объекта [14, 18, 11]; сроков капитальных ремонтов или замен оборудования [12, 13]; числа ремонтных бригад и их оснащения [3]; номенклатуры и количества запасных частей для восстановительных работ (например, на насосных станциях и очистных сооружениях ВКХ) и многих других вопросов.

## Методы и материалы

Алгоритмически для решения таких задач существуют подходы, рассматривающие процессы «отказ–восстановление» объекта как марковские [4]. Однако когда речь идет о разработке методик, удобных в практических инженерных расчетах, добиться результатов часто не удается из-за математических трудностей сугубо технического характера (например, невозможности вычисления некоторых интегралов в элементарных функциях).

Подобных проблем не возникает, когда рассматриваемый объект находится под воздействием стационарного пуассоновского (иначе простейшего) потока событий, при котором интенсивность его отказов (восстановлений) не изменяется с течением времени. Во многих случаях гипотеза стационарности подтверждается наблюдениями за реальными объектами, функ-

ционирующими в нормальных условиях эксплуатации; к тому же она имеет достаточно убедительные теоретические обоснования. Именно эти обстоятельства привели к тому, что к настоящему времени подавляющее большинство существующих инженерных методик решения различных надежностных задач базируется на гипотезе стационарности процессов отказ–восстановление.

Однако реальным наблюдаемым фактом является и то, что для некоторых объектов интенсивность их отказов  $\lambda$  по мере длительной эксплуатации  $t$  проявляет явную тенденцию к изменению, т. е. имеет место некоторая зависимость  $\lambda = \lambda(t)$ , и объект, следовательно, становится нестационарным (в смысле надежности).

Попытки аналитически записать функцию  $\lambda(t)$  в замкнутом виде на всем жизненном цикле объекта восходят к работе Перкса (Perks) [15], где предложена так называемая «функция смертности», обобщающая многочисленные данные демографической статистики. При определенном сочетании параметров этой зависимости ее график представляет собой корытообразную кривую, характерную, как выяснилось в последующем, для описания интенсивности отказов также и большинства технических объектов на интервале времени от 0 до  $\infty$ . Сложилось целое направление в теории надежности, базирующееся на этой аналогии. Типичной работой последнего времени, использующей такой подход, является публикация [17], где интенсивность отказов технического объекта  $\lambda(t)$  записывается в виде громоздких, практически неприменимых в инженерных расчетах четырех- и пятипараметрических функций. Эти зависимости характерны тем, что по истечении некоторого времени эксплуатации, на протяжении которого интенсивность отказов объекта можно считать постоянной,  $\lambda(t)$  начинает заметно возрастать. Физически это объясняется старением, износом и тому подобными факторами, из-за чего объекты на таком этапе функционирования называют еще «стареющими».

В силу целого ряда причин многие объекты инфраструктуры ВКХ крупных городов к настоящему времени находятся на такой стадии эксплуатации, когда их можно отнести к стареющим. В связи с этим возникает дилемма: с одной стороны, повышение ответственности технических решений, принимаемых для обеспечения нор-

мального уровня функционирования подобных объектов, а с другой — отсутствие научно-обоснованных удобных инженерных методик разработки таких решений, поскольку объекты становятся нестационарными.

Одним из возможных подходов к разрешению подобных проблем является формальная замена реального объекта виртуальным, характеристики которого, в некотором смысле, «похожи» на характеристики реального объекта, но существенно упрощают их анализ [2, 7, 9, 10]. Разумеется, такая модель является приближенной, но при приемлемой точности аппроксимации она позволяет получать оценки решений соответствующих задач в аналитическом виде, удобном для практических расчетов.

Ниже предлагается подход, в основе которого лежит замена реального нестационарного (в смысле надежности) объекта неким стационарным с фиктивным параметром отказов  $\lambda_c$ , значение которого подбирается по некоторому принятому критерию.

Теоретически надежность объекта описывается его характеристиками надежности. На практике определение любой из них всегда связано с обработкой репрезентативной выборки данных наблюдений и подбором некоторой аналитической зависимости (например, методом наименьших квадратов), не противоречащей этим данным по принятому критерию согласия статистических гипотез [3]. В производственных условиях обычно проще всего таким образом определять зависимость  $\lambda(t)$ . Поэтому далее будем считать, что  $\lambda(t)$  — заданная функция времени.

Известно [4], что основные временные характеристики надежности выражаются одна через другую. Так, функция надежности  $p(t)$  — вероятность того, что в пределах заданной наработки  $t$  отказ объекта не возникает — связана с  $\lambda(t)$  соотношением

$$p(t) = \exp \left[ - \int_0^t \lambda(t) dt \right]. \quad (1)$$

Для стационарного случая, когда  $\lambda(t) = \text{const} = \lambda_c$ , выражение (1) приобретает вид:

$$p_c(t) = \exp[-\lambda_c t], \quad (2)$$

где  $p_c(t)$  — функция надежности стационарного объекта;  $\lambda_c$  — постоянная интенсивность его отказов.

Идея предлагаемого метода состоит в аппроксимации функции надежности реального нестационарного объекта  $p(t)$  функцией надежности некоего виртуального стационарного объекта  $p_c(t)$ , единственный параметр которой  $\lambda_c$  подбирается из дополнительного условия. Это дает возможность использовать хорошо разработанные методики решения стационарных надежностных задач для анализа надежности стареющих объектов в аналитическом, хоть и приближенном, виде, удобном для дальнейшего применения в инженерных расчетах.

В данной статье предлагается  $\lambda_c$  вычислять из условия равенства функций надежности реального и виртуального объектов в некоторых характерных точках временной оси. Одной из таких точек, в частности, является значение  $t = \frac{1}{\lambda_c}$ , при котором, как это видно из (2), показатель степени экспоненты становится равным (-1). Тогда из соотношения

$$p_c \left( t = \frac{1}{\lambda_c} \right) = p \left( t = \frac{1}{\lambda_c} \right) \quad (3)$$

вытекает следующее уравнение

$$1 - \int_0^{\frac{1}{\lambda_c}} \lambda(t) dt = 0, \quad (4)$$

решение которого дает значение интенсивности отказов  $\lambda_c$ , «стационаризирующее» реальный стареющий объект. Заметим, что  $\lambda_c$  выражается через известные коэффициенты функции  $\lambda(t)$ .

В качестве примера рассмотрим вычисление  $\lambda_c$  для двух видов функции  $\lambda(t)$ , которые часто хорошо описывают процесс старения объекта.

1. Функция  $\lambda(t)$  линейна:

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \alpha t; \quad (\alpha \geq 0). \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4) и решая полученное уравнение, имеем

$$\lambda_c = \frac{\alpha}{\lambda_0 \left( \sqrt{1 + \frac{2\alpha}{\lambda_0^2}} - 1 \right)}. \quad (6)$$

2. Реальный объект «стареет» по закону возрастающей экспоненты:

$$\lambda(t) = \lambda_0 \cdot e^{\alpha t}; \quad (\alpha \geq 0). \quad (7)$$

Выполняя необходимые действия, получаем:

$$\lambda_c = \frac{\alpha}{\ln\left(1 + \frac{\alpha}{\lambda_0}\right)}. \quad (8)$$

Вид выражений (6) и (8) вполне удобен как при проведении инженерных расчетов, так и для дальнейших аналитических исследований.

Подчас некоторые задачи, упомянутые в начале статьи, могут быть решены с использованием лишь числовых характеристик надежности, в частности — средней наработки объекта до отказа  $T$ . Аналитическое определение этого показателя для стареющих объектов возможно далеко не всегда. Из предложенной выше методологии стационаризации процесса вытекает альтернативный способ вычисления оценки  $T$  по приближенному соотношению:

$$T \approx T_c, \quad (9)$$

где  $T_c$  связано с  $\lambda_c$  известным выражением [4]:

$$T_c = \frac{1}{\lambda_c}. \quad (10)$$

Так, например, для линейно-стареющего объекта (5) оценка среднего времени наработки до отказа  $T_c$ , с учетом (6), равна:

$$T_c = \frac{2}{\lambda_0} \cdot x \cdot (\sqrt{1+x^2} - x), \quad (11)$$

где введена безразмерная величина

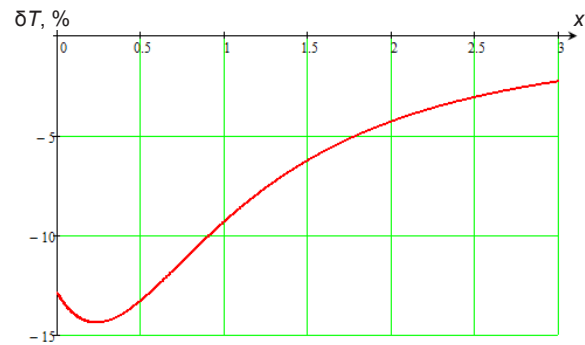
$$x = \frac{\lambda_0}{\sqrt{2\alpha}}, \quad (12)$$

характеризующая относительную скорость старения объекта.

Аналитически вычислить погрешность, допускаемую при определении  $T$  по значению оценки  $T_c$ , в общем случае весьма затруднительно. Это удастся сделать лишь для тех редких случаев, когда вид функции  $\lambda(t)$  позволяет точно вычислить значение  $T$ . Одним из них является случай линейно-стареющего объекта, интенсивность отказов которого описывается выражением (5). Используем [6], где для  $T$  получено:

$$T = \frac{\sqrt{\pi}}{\lambda_0} \cdot x \cdot [1 - \Phi(x)] \cdot e^{x^2}, \quad (13)$$

где  $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^x e^{-x^2} dx$  — интеграл вероятности, для вычисления которого имеются подробные таблицы [5]. Располагая выражениями (11) и (13), вычисляем относительную ошибку  $\delta T$ , допускаемую при оценке средней наработки до отказа



Зависимость относительной ошибки от безразмерного параметра  $x$

реального линейно-стареющего объекта  $T$  по его виртуальному («стационарному») аналогу  $T_c$ :

$$\delta T = \frac{T - T_c}{T} 100 = \left\{ 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{(\sqrt{1+x^2} - x) e^{-x^2}}{1 - \Phi(x)} \right\} 100, \%. \quad (14)$$

Как видно из (14), относительная ошибка зависит только от одной переменной  $x$ , что дает возможность отобразить ее графически (см. рисунок).

#### Результаты и обсуждение

Анализ кривой, представленной на рисунке, позволяет сделать такие выводы:

— при любых сочетаниях  $\lambda_0$  и  $\alpha$  (см. (12)) оценка среднего времени наработки до отказа (иногда называемом «временем жизни объекта») по выражению  $T_c$  всегда дает завышенное значение;

— максимальное превышение  $T_c$  над  $T$  имеет место при значении  $E \approx 0,2$  и примерно равно 14,5 %;

— при значениях  $x$ , больших 2, относительная ошибка не превышает 4,5 % и, по мере увеличения  $x$ , монотонно стремится к нулю.

Несколько слов о физической интерпретации полученного результата. Из (12) видно, что малые значения  $x$  имеют место, когда  $\alpha$  очень велико. Но если это так, то процессы старения становятся «катастрофическими», и именно они начинают играть преобладающую, определяющую роль в резком увеличении интенсивности отказов объекта. На практике это говорит о том, что в подобных случаях, скорее всего, какие-либо ме-



роприятия по восстановлению работоспособности объекта становятся явно нецелесообразными (например, по экономическим причинам), и очевидное решение относительно такого объекта — его немедленная замена. Эти сугубо качественные рассуждения дают, однако, основания предполагать, что в реальных случаях «умеренного» старения объекта значения безразмерной величины  $x$  не слишком малы, и, следовательно, относительная погрешность разработанной в статье методики не превышает 4–5 %.

### Заключение

Для стареющих объектов, интенсивность отказов которых со временем эксплуатации увеличивается, основная идея предложенного в статье метода состоит в фиктивной замене реального нестационарного объекта его виртуальным аналогом, поток отказов которого стационарен и характеризуется некоторой постоянной интенсивностью. При этом значение этой постоянной интенсивности «увязывается» с параметрами «закона старения» реального объекта и определяется из некоторых дополнительных соображений. На примере линейно-стареющего объекта показано, что погрешность в вычислении среднего времени наработки до отказа нестационарного объекта — важнейшего показателя надежности — при такой замене в реальных условиях не превышает 4–5 %, что вполне допустимо для инженерной практики.

Таким образом, предложенная процедура приближенной стационаризации основных характеристик надежности стареющих объектов ВКХ дает возможность применять для практических расчетов хорошо разработанные методики решения стационарных надежностных задач с приемлемой точностью. В дальнейшем предполагается проведение анализа методической погрешности рассмотренной в статье процедуры аппроксимации для других «законов старения» реальных объектов ВКХ.

### Литература

1. Алексеев, М. И. и Ермолин, Ю. А. (2015). Надежность сетей и сооружений систем водоотведения. М.: Издательство АСВ, 200 с.
2. Баранов, Л. А. и Ермолин, Ю. А. (2017). Надежность объектов с нестационарной интенсивностью отказов. Надежность, т. 17, № 4, сс. 3–9. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-4-3-9.

3. Вентцель, Е. С. (1980). Исследование операций: задачи, принципы, методология. М.: Наука, 208 с.
4. Гнеденко, Б. В., Беляев, Ю. К. и Соловьев, А. Д. (1965). Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 524 с.
5. Янке, Е., Эмде, Ф. и Лёш, Ф. (1977). Специальные функции. Формулы, графики, таблицы. 3-е изд. М.: Наука, 342 с.
6. Baranov, L. A. and Ermolin, Y. A. (2015). Estimation of reliability indices of a “linearly ageing” object. *Dependability*, No. 4, pp. 57–64. DOI: 10.21683/1729-2646-2015-0-4-57-64.
7. Baranov, L. A. and Ermolin, Y. A. (2017). Reliability of systems with periodic piecewise constant failure rate. *Russian Electrical Engineering*, Vol. 88, Issue 9, pp. 605-608. DOI: 10.3103/S1068371217090048.
8. Engelhardt, M. O., Skipworth, P. J., Savic, D. A., Saul, A. J. and Walters, G. A. (2000). Rehabilitation strategies for water distribution networks: a literature review with a UK perspective. *Urban Water*, Vol. 2, Issue 2, pp. 153–170. DOI: 10.1016/S1462-0758(00)00053-4.
9. Ermolin, Y. A. (2007). Reliability calculation under seasonally varying failure rate. *ISA Transactions*, Vol. 46, Issue 1, pp. 123-130. DOI: 10.1016/j.isatra.2006.06.005.
10. Ermolin, Y. A. (2008). Stationarization of the seasonally changing failure flow (with reference to reliability problems). *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 32, Issue 10, pp. 2034–2040. DOI: 10.1016/j.apm.2007.06.032.
11. Ermolin, Y. A. and Alexeev, M. I. (2018). Reliability measure of a sewer network. *Water and Ecology*, No. 2, pp. 51–58. DOI: 10.23968/2305-3488.2018.20.2.51-58.
12. Ke H. and Yao K. (2016). Block replacement policy with uncertain life times. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 148, pp. 119–124. DOI: 10.1016/j.res.2015.12.008.
13. Lim, J. H., Qu J. and Zuo M. J. (2016). Age replacement policy based on imperfect repair with random probability. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 149, pp. 24–33. DOI: 10.1016/j.res.2015.10.020.
14. Mancuso, A., Compare, M., Salo, A., Zio, E. and Laakso, T. (2016). Risk-based optimization of pipe inspections in large underground networks with imprecise information. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 152, pp. 228–238. DOI: 10.1016/j.res.2016.03.011.
15. Perks, W. (1932). On some experiments in the graduation of mortality statistics. *Journal of the Institute of Actuaries*, Vol. 63, Issue 1, pp. 12–57. DOI: 10.1017/S0020268100046680.
16. Quimpo, R. G. and Shamsi, U. M. (1991). Reliability-based distribution system maintenance. *Journal of Water Resources Planning and Management Division*, Vol. 117, Issue 3, pp. 321–339. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1991)117:3(321).
17. Zeng, H., Lan, T. and Chen, Q. (2016). Five and four-parameter lifetime distributions for bathtub-shaped failure rate using Perks mortality equation. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 152, pp. 307–315. DOI: 10.1016/j.res.2016.03.014.
18. Zhao, X., Al-Khalifa, K. N. and Nakagawa, T. (2015). Approximate methods for optimal replacement, maintenance, and inspection policies. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 144, pp. 68–73. DOI: 10.1016/j.res.2015.07.005.

## References

1. Alexeev, M. I. and Ermolin, Y. A. (2015). Reliability of networks and structures of water disposal systems. Moscow: Izdatelstvo ASV, 200 p.
2. Baranov, L. A. and Yermolin, Y. A. (2017). Dependability of objects with non-stationary failure rate. *Dependability*, Vol. 17, No. 4, pp. 3–9. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-4-3-9.
3. Ventzel, Ye. S. (1980). Operations analysis: problems, principles, methodology. Moscow: Nauka, 208 p.
4. Gnedenko, B. V., Beliaev, Yu. K. and Soloviev, A. D. (1965). Mathematical methods in the reliability theory. Moscow: Nauka, 524 p.
5. Jahnke, E., Emde, F. and Lösch, F. (1977). Special functions. Formulas, graphs, tables. 3<sup>rd</sup> edition. Moscow: Nauka, 342 p.
6. Baranov, L. A. and Ermolin, Y. A. (2015). Estimation of reliability indices of a “linearly ageing” object. *Dependability*, No. 4, pp. 57–64. DOI: 10.21683/1729-2646-2015-0-4-57-64.
7. Baranov, L. A. and Ermolin, Y. A. (2017). Reliability of systems with periodic piecewise constant failure rate. *Russian Electrical Engineering*, Vol. 88, Issue 9, pp. 605–608. DOI: 10.3103/S1068371217090048.
8. Engelhardt, M. O., Skipworth, P. J., Savic, D. A., Saul, A. J. and Walters, G. A. (2000). Rehabilitation strategies for water distribution networks: a literature review with a UK perspective. *Urban Water*, Vol. 2, Issue 2, pp. 153–170. DOI: 10.1016/S1462-0758(00)00053-4.
9. Ermolin, Y. A. (2007). Reliability calculation under seasonally varying failure rate. *ISA Transactions*, Vol. 46, Issue 1, pp. 123–130. DOI: 10.1016/j.isatra.2006.06.005.
10. Ermolin, Y. A. (2008). Stationarization of the seasonally changing failure flow (with reference to reliability problems). *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 32, Issue 10, pp. 2034–2040. DOI: 10.1016/j.apm.2007.06.032.
11. Ermolin, Y. A. and Alexeev, M. I. (2018). Reliability measure of a sewer network. *Water and Ecology*, No. 2, pp. 51–58. DOI: 10.23968/2305–3488.2018.20.2.51–58.
12. Ke H. and Yao K. (2016). Block replacement policy with uncertain life times. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 148, pp. 119–124. DOI: 10.1016/j.res.2015.12.008.
13. Lim, J. H., Qu J. and Zuo M. J. (2016). Age replacement policy based on imperfect repair with random probability. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 149, pp. 24–33. DOI: 10.1016/j.res.2015.10.020.
14. Mancuso, A., Compare, M., Salo, A., Zio, E. and Laakso, T. (2016). Risk-based optimization of pipe inspections in large underground networks with imprecise information. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 152, pp. 228–238. DOI: 10.1016/j.res.2016.03.011.
15. Perks, W. (1932). On some experiments in the graduation of mortality statistics. *Journal of the Institute of Actuaries*, Vol. 63, Issue 1, pp. 12–57. DOI: 10.1017/S0020268100046680.
16. Quimpo, R. G. and Shamsi, U. M. (1991). Reliability-based distribution system maintenance. *Journal of Water Resources Planning and Management Division*, Vol. 117, Issue 3, pp. 321–339. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1991)117:3(321).
17. Zeng Zeng, H., Lan, T. and Chen, Q. (2016). Five and four-parameter lifetime distributions for bathtub-shaped failure rate using Perks mortality equation. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 152, pp. 307–315. DOI: 10.1016/j.res.2016.03.014.
18. Zhao, X., Al-Khalifa, K. N. and Nakagawa, T. (2015). Approximate methods for optimal replacement, maintenance, and inspection policies. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 144, pp. 68–73. DOI: 10.1016/j.res.2015.07.005.

## Авторы

**Алексеев Михаил Иванович**, д-р техн. наук, профессор Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: m.i.alexeev@mail.ru

**Баранов Леонид Аврамович**, д-р техн. наук, профессор Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия  
E-mail: baranov.miit@gmail.ru

**Ермолин Юрий Александрович**, д-р техн. наук, профессор Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия  
E-mail: ermolin.y@yandex.ru

## Authors

**Alexeev Mickael Ivanovich**, Dr. of Engineering, Professor Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia  
E-mail: m.i.alexeev@mail.ru

**Baranov Leonid Avramovich**, Dr. of Engineering, Professor Russian University of Transport, Moscow, Russia  
E-mail: baranov.miit@gmail.ru

**Ermolin Yuri Alexandrovich**, Dr. of Engineering, Professor Russian University of Transport, Moscow, Russia  
E-mail: ermolin.y@yandex.ru