

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

УДК 625.7/8 – 027.45

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-3-207-213

*Р.П. МОИСЕЕНКО, В.Н. ЕФИМЕНКО,*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет*

## К ОЦЕНКЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Оценка долговечности эксплуатируемых транспортных сооружений – это стабильно актуальный вопрос для дорожной отрасли Российской Федерации, административные образования которой характеризуются неоднородностью показателей плотности, продолжительности функционирования и, соответственно, состояния имеющейся сети автомобильных дорог. О важности обсуждаемой в статье проблемы свидетельствуют документы последних лет, отражающие стратегические задачи развития регионов РФ и сформулированные в указах Президента России (см., например, Указ от 07.5.2018). Использование математической теории надёжности обусловлено вероятностным характером многочисленных факторов, влияющих на продолжительность эффективной службы элементов дороги. В статье представлены результаты расчёта долговечности автомобильных дорог с применением функций интенсивности отказов, базирующихся на экспоненциальном законе, законе Вейбулла и объединённом законе. Рассмотренные в статье варианты расчёта долговечности, с учётом названных функций, обеспечивают достаточно объективную оценку показателей для автомобильных дорог с нежёстким типом дорожной одежды. Расчёт долговечности транспортного сооружения произведён по несложному алгоритму. Основная трудность в использовании данного алгоритма состоит в необходимости экспериментального определения параметров функции интенсивности отказов, но эта трудность характерна для любого статистического метода. При этом среди факторов воздействия на изменчивость параметров следует выделить географический комплекс, индивидуально характерный для региона исследования. Поэтому в перспективе для определения интенсивности отказов элементов эксплуатируемых автомобильных дорог необходимо создание региональных баз данных, характеризующих техническое состояние автомобильных дорог и их элементов в соответствии с отраслевыми нормативными документами.

**Ключевые слова:** долговечность; надёжность; автомобильная дорога; интенсивность отказов; экспоненциальный закон; закон Вейбулла; объединённый закон.

**Для цитирования:** Моисеенко Р.П., Ефименко В.Н. К оценке долговечности автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 3. С. 207–213.

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-3-207-213

R.P. MOISEENKO, V.M. EFIMENKO,  
Tomsk State University of Architecture and Building

## TOWARDS DURABILITY OF AUTOMOBILE ROADS

Evaluation of the durability of the road is a consistently relevant industry problem. The use of mathematical theory of reliability is due to the probabilistic nature of many factors affecting the duration of the effective service of road elements. The article presents the results of calculating the durability of road using the failure rate functions based on the exponential law, the Weibull law and the United law. The variants of calculation of durability considered in article, taking into account the called functions, provide rather objective assessment of indicators for highways with non-rigid type of road clothes. The calculation of the durability of the transport structure is made by a simple algorithm. The main difficulty in using this algorithm is the need for experimental determination of the parameters of the failure rate function, but this difficulty is typical for any statistical method. At the same time, among the factors affecting the variability of parameters should be identified geographical complex, individually characteristic of the region of study. Therefore, in the future, to determine the failure rate of the elements of the operated roads, it is necessary to create regional Bach data characterizing the technical condition of roads and their elements in accordance with industry regulators.

**Keywords:** durability; reliability; road; failure rate; exponential law; Weibull distribution; consolidated act.

**For citation:** Moiseenko R.P., Efimenko V.M. K otsenke dolgovechnosti avtomobil'nykh dorog [Towards durability of automobile roads]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2019. V. 21. No. 3. Pp. 207–213.

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-3-207-213

### Введение

В работе [1] показано, что расчёт надёжности автомобильных дорог в соответствии с методикой математической теории надёжности разделён на два этапа. Первый этап – расчёт начальной надёжности, второй этап – расчёт долговечности. Пример, отражающий вычисления начальной надёжности сооружения, представлен в статье [2]. Это разделение в современной научной и нормативной литературе не принято. Как правило, исследователи применяют методику косвенного учёта зависимости прочности дорожной конструкции от срока её службы или, наоборот, продолжительности эксплуатации от прочности сооружения [3, 4]. В расчётах автомобильных дорог используют параметры системы, которые устанавливают с учётом заданного времени безотказной работы инженерного сооружения [5, 6]. Функция долговечности, выведенная через интенсивность отказов [7], не применяется.

Обе методики основаны на использовании статистических данных, но экспериментальное определение комплексного показателя (интенсивность отказов) значительно проще, чем определение отдельных параметров, например модулей упругости, перемещений и т. д. К тому же методика расчёта долговечности, учитывающая в расчётах отдельные параметры, определяющие надёжность сооружения, требует обработки экспериментальных данных в виде множества приблизительно аппроксимирующих функций или уравнений и не гарантирует более высокой точности вычислений. К сожалению, алгоритмы

расчёта долговечности, представленные в коллективной монографии учёных-дорожников [3], содержат уравнения, достоверность которых сомнительна. Например, условие, приведённое в отмеченной работе под номером (П.50):

$$p \leq \frac{1}{C_{\text{тр}}^{(\text{кап})}},$$

где  $p$  – вероятность, т. е. безразмерная величина;  $C_{\text{тр}}^{(\text{кап})}$  – нормативный срок службы между двумя смежными капитальными ремонтами, т. е. величина, имеющая размерность (годы). В показанном примере размерность  $C_{\text{тр}}^{(\text{кап})}$  не учитывается, но разъяснений по этому поводу в тексте нет.

Таким образом, долговечность автомобильных дорог должна учитываться не по косвенным показателям, а на основе алгоритмов теории надёжности.

**Постановка задачи.** Автомобильная дорога – это восстанавливаемая система. Но в общем случае аналитический расчёт восстанавливаемых систем не разработан [7]. Поэтому в промежутках между ремонтами автомобильная дорога рассчитывается как невосстанавливаемая система.

Долговечность элементов невосстанавливаемых систем имеет следующие показатели [7]:

$P(t)$  – вероятность безотказной работы элемента в течение времени  $t$  (функция долговечности);

$f(t)$  – плотность распределения времени безотказной работы;

$\lambda(t)$  – интенсивность отказов в момент времени  $t$ ;

$T_0$  – среднее время безотказной работы;

$P_0$  – начальная надёжность элемента (вероятность безотказной работы при нормативных средних значениях параметров прочности и жёсткости автомобильной дороги).

Между показателями долговечности существуют следующие зависимости:

$$P(t) = P_0 e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}; \quad (1)$$

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (2)$$

Выражения (1), (2) показывают, что исходной функцией в расчёте долговечности является интенсивность отказов. Все параметры функции интенсивности отказов определяются экспериментально. Наиболее часто применяются две функции.

1. Экспоненциальный закон:

$$\lambda = \text{const} \Rightarrow P(t) = P_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow T_0 = \frac{P_0}{\lambda}. \quad (3)$$

2. Закон Вейбулла:

$$\lambda(t) = \alpha \lambda t^{(\alpha-1)} \Rightarrow P(t) = P_0 e^{-\lambda t^\alpha} \Rightarrow T_0 = P_0 \int_0^{\infty} e^{-\lambda t^\alpha} dt. \quad (4)$$

Основной недостаток экспоненциального закона «отсутствие последствия» (независимость числа отказов в данный период от числа отказов в прошлом) отмечен в работе [3]. Но экспоненциальный закон рекомендуется применять в сравнительно короткие промежутки времени [8]. В этом случае влияние «последствия» не имеет существенного значения, и экспоненциальный закон может быть применён в расчётах долговечности автомобильных дорог.

Закон Вейбулла часто востребован при характеристике статистических рядов, характеризующих те или иные параметры, отражающие состояние автомобильных дорог [9, 10]. С помощью закона Вейбулла можно учесть постепенные отказы, наблюдаемые в процессе службы автомобильных дорог.

В статье предлагается использовать для расчёта долговечности автомобильных дорог объединённый закон:

$$\lambda(t) = \lambda_1 + \alpha\lambda_2 t^{(\alpha-1)} \Rightarrow P(t) = P_0 e^{-(\lambda_1 t + \lambda_2 t^\alpha)} \Rightarrow T_0 = P_0 \int_0^\infty e^{-(\lambda_1 t + \lambda_2 t^\alpha)} dt. \quad (5)$$

Объединённый закон учитывает внезапные и постепенные отказы. Сочетание внезапных и постепенных отказов также характерно для эксплуатируемых автомобильных дорог.

Варианты расчётов представлены в примерах.

**Пример 1.** Рассматривается экспоненциальный закон. Пусть  $P_0 = 0,99$ ;  $T_0 = 5$  лет. Для автомобильной дороги при пятилетней эксплуатации влияние последствия можно не учитывать. Тогда из выражений (3) следует

$$T_0 = \frac{P_0}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{P_0}{T_0} = \frac{0,99}{5} = 0,198 \text{ (год}^{-1}\text{)}.$$

Функция долговечности определяется по формуле  $P(t) = P_0 e^{-\lambda t}$ . Значения функции долговечности представлены в табл. 1.

Таблица 1

$t$ (лет)	0	1	2	3	4	5
$P(t)$	0,99	0,812	0,666	0,546	0,448	0,368

Из данных таблицы следует, что приемлемый уровень функции долговечности ( $P = 0,9$  [6]) сооружения соответствует половине первого года. Более высокий уровень долговечности возможен при резком снижении интенсивности отказов. Но тогда возрастает среднее время безотказной работы и увеличивается влияние последствия. Пример показывает, что экспоненциальный закон можно применять, если дорога эксплуатируется в критических условиях.

**Пример 2.** Рассматривается применение закона Вейбулла. Пусть  $P_0 = 0,99$ ;  $\alpha = 2$ ;  $\lambda = 0,00(3)$ . В соответствии с выражениями (4) функция долговечности установлена по формуле  $P(t) = P_0 e^{-\lambda t^\alpha} = 0,99 e^{-0,00(3)t^2}$ . Значения функции долговечности представлены в табл. 2.

Таблица 2

$t$ (лет)	0	4	8	12	16	20	24	28
$P(t)$	0,99	0,9385	0,8	0,6126	0,4217	0,261	0,145	0,0725

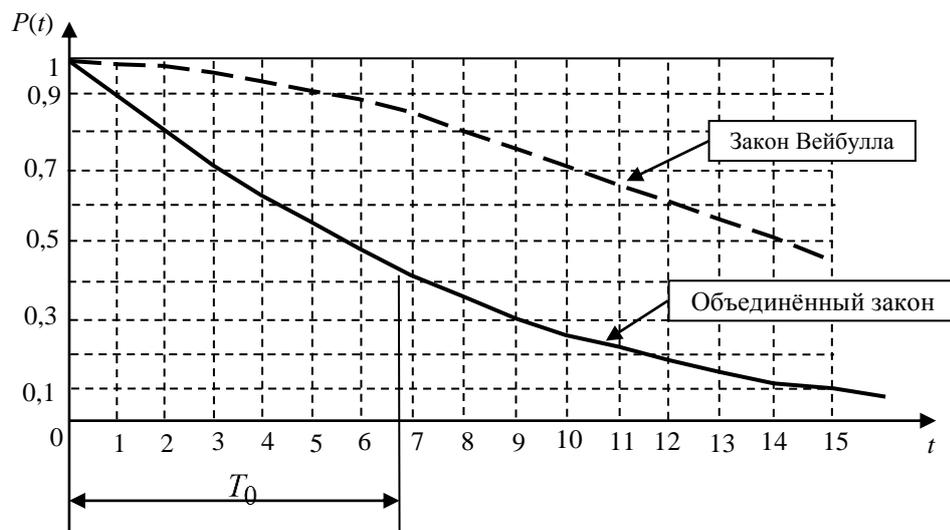
Среднее время безотказной работы автомобильной дороги в соответствии с выражением (4) определяется по формуле  $T_0 = P_0 \int_0^{\infty} e^{-\lambda t^\alpha} dt$ . Интеграл вычислен по формуле трапеций:  $T_0 = 14,84$  (года).

**Пример 3.** Рассматривается объединённый закон (5). Пусть  $P_0 = 0,99$ ;  $\alpha = 2$ ;  $\lambda = 0,00(3)$ ;  $\lambda_1 = 0,1$ . Функция долговечности определена по формуле  $P(t) = P_0 e^{-(\lambda_1 t + \lambda_2 t^\alpha)}$ . Значения функции долговечности представлены в табл. 3.

Таблица 3

$t$ (лет)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$P(t)$	0,99	0,8928	0,8	0,7117	0,63	0,5524	0,482	0,4175	0,36
$t$ (лет)	9	10	11	12	13	14	15	16	17
$P(t)$	0,307	0,261	0,22	0,1845	0,1536	0,127	0,1043	0,085	0,069

Среднее время безотказной работы определено по формуле  $T_0 = P_0 \int_0^{\infty} e^{-(\lambda_1 t + \lambda_2 t^\alpha)} dt$ . Формула трапеций даёт результат:  $T_0 = 6,82$  (года). Численные результаты расчёта долговечности представлены на графике (рисунок).



Функция долговечности

Для сравнения на рисунке представлена функция долговечности Вейбулла с принятыми в примере 3 параметрами  $\alpha, \lambda_2$ . Сравнение показывает, что наиболее предпочтителен закон Вейбулла с постепенным нарастанием

интенсивности отказов. Но это теоретическое преимущество нельзя использовать, если опыт эксплуатации автомобильной дороги свидетельствует о возможности внезапных отказов. В этом случае необходимо использовать объединённый закон интенсивности отказов.

### Выводы

В статье показано, что разработка прямого метода расчёта долговечности автомобильных дорог, основанного на функции интенсивности отказов, является актуальной задачей. Наиболее полно отражает особенности эксплуатации автомобильных дорог объединённый закон интенсивности отказов, позволяющий учитывать внезапные и постепенные отказы. Установить связь между параметрами объединённого закона ( $\lambda_1, \alpha, \lambda_2$ ) и случайными прочностными характеристиками дорожной конструкции практически невозможно. Трудность аналитического решения подобных задач ранее отмечена в литературе (например, [3]). В подобных условиях задача может быть решена при обязательной организации и проведении серии экспериментов по установлению тех или иных связей эксплуатационного состояния элементов автомобильных дорог в характерном для конкретного региона географическом комплексе с последующим выявлением формул эмпирических зависимостей. Поставленная задача расчёта долговечности автомобильных дорог предполагает комплекс дальнейших региональных экспериментальных исследований с формированием банка исходных данных для прогноза возможных отказов. Необходимость региональных экспериментальных работ, влияющих на срок службы автомобильных дорог, отмечается многими учёными-дорожниками (например, [4, 11]).

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *MATEC Web of Conferences*. 2018. V. 143. P. 01004.
2. Моисеенко Р.П., Пушкарёва Г.В., Акимов Б.Г., Стещенко А.О. Расчёт надёжности нежёстких дорожных одежд методом моментов по критерию допускаемого прогиба // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 6. С. 220–226.
3. Золотарь И.А., Некрасов В.К., Коновалов С.В., Яковлев Ю.М., Коганзон М.С. Повышение надёжности автомобильных дорог. М. : Транспорт, 1977. 183 с.
4. Ефименко В.Н., Ефименко С.В., Бадина М.В. Пути обеспечения эксплуатационной надёжности автомобильных дорог в природных условиях Сибири // Транспортное строительство / ТРАНСПОРТ Российской Федерации. 2007. № 1. С. 18, 19.
5. Столяров В.В. Проектирование автомобильных дорог с учётом теории риска: в 2 ч. Ч. I. Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 1994. 184 с.
6. Столяров В.В. Проектирование автомобильных дорог с учётом теории риска: в 2 ч. Ч. II. Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 1994. 232 с.
7. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надёжности. 2-е изд., перераб. и доп. СПб. : БХВ-Петербург, 2006. 704 с.
8. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьёв А.Д. Математические методы в теории надёжности. М. : Либроком, 2017. 584 с.
9. Рокас С.Ю. Статистический контроль качества в дорожном строительстве. М. : Транспорт, 1977. 152 с.
10. Семёнов В.А. Качество и однородность автомобильных дорог. М. : Транспорт, 1989. 125 с.
11. Васильев А.П., Ефименко В.Н. К обоснованию протяжения автомобильных дорог, подлежащих реконструкции, модернизации, капитальному ремонту и ремонту, в субъектах

федерации // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 6. С. 157–167.

## REFERENCES

1. *MATEC Web of Conferences*. 2018. V. 143. P. 01004.
2. *Moiseenko R.P., Pushkareva G.V., Akimov B.G., Steshenko A.O.* Raschet nadezhnosti nezhestkikh dorozhnykh odezhd metodom momentov po kriteriyu dopuskaemogo progiba [Reliability analysis of flexible pavements using moments method and bending strain criterion]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017. No. 6. Pp. 220–226.
3. *Zolotar' I.A., Nekrasov V.K., Konovalov S.V., Yakovlev Yu.M., Koganzon M.S.* Povyshenie nadezhnosti avtomobil'nykh dorog [Roads reliability improvement]. Moscow: Transport, 1977. 183 p. (rus)
4. *Efimenko V.N., Efimenko S.V., Badina M.V.* Puti obespecheniya ekspluatatsionnoi nadezhnosti avtomobil'nykh dorog v prirodnykh usloviyakh Sibiri [Ways to ensure the operational reliability of roads in Siberian natural conditions]. *Transportnoe stroitel'stvo / Transport Rossiiskoi Federatsii*. 2007. No. 1. Pp. 18, 19.
5. *Stolyarov V.V.* Proektirovanie avtomobil'nykh dorog s uchetom teorii riska [The design of roads, taking into account the theory of risk], in 2 parts. Pt I. Saratov, 1994. 184 p. (rus)
6. *Stolyarov V.V.* Proektirovanie avtomobil'nykh dorog s uchetom teorii riska [The design of roads, taking into account the theory of risk], in 2 parts. Pt II. Saratov, 1994. 232 p. (rus)
7. *Polovko A.M., Gurov S.V.* Osnovy teorii nadezhnosti [Fundamentals of reliability theory]. 2nd ed., St.- Petersburg: BKhV-Peterburg, 2006. 704 p. (rus)
8. *Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solov'ev A.D.* Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti [Mathematical methods in the reliability theory]. Moscow: Librokom, 2017. 584 p. (rus)
9. *Rokas S.Yu.* Statisticheskii kontrol' kachestva v dorozhnom stroitel'stve [Statistical quality control in road construction]. Moscow: Transport, 1977. 152 p. (rus)
10. *Semenov V.A.* Kachestvo i odnorodnost' avtomobil'nykh dorog [Quality and uniformity of roads]. Moscow: Transport, 1989. 125 p. (rus)
11. *Vasil'ev A.P., Efimenko V.N.* K obosnovaniyu protyazheniya avtomobil'nykh dorog, podlezhashchikh rekonstruktsii, modernizatsii, kapital'nomu remontu i remontu, v sub'ektakh federatsii [Roadway reconstruction, modernization, and replacement in sub-sovereign entities]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 5. Pp. 157–167 (rus)

## Сведения об авторах

*Моисеенко Ростислав Павлович*, докт. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

*Ефименко Владимир Николаевич*, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

## Authors Details

*Rostislav P. Moiseenko*, DSc, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia.

*Vladimir M. Efimenko*, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia.