

Влияние изменения климата на функциональную надежность автотранспортных сетей

The effect of climate change on the functional reliability of motor transport networks

Тимашев С.А.^{1,2*}, Пономарев В.А.^{1*}
Timashev S.A.^{1,2*}, Ponomarev V.A.^{1*}

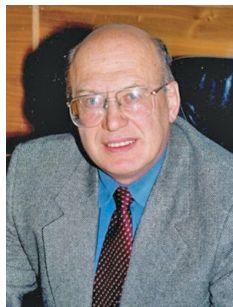
¹ Научно-инженерный центр «Надежность и ресурс больших систем и машин» Уральского отделения Российской академии наук, Российская Федерация, Екатеринбург

² Уральский Федеральный Университет, Российская Федерация, Екатеринбург

¹ Research and Engineering Centre Reliability and Service Life of Large-Scale Systems and Machines, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

² Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation

* E-mail: timashevs@gmail.com, wasilko@rambler.ru



Тимашев С.А.



Пономарев В.А.

Резюме. Цель. В статье рассматривается проблема учета влияния изменения климата на функциональную надежность региональных дорожных сетей. Предложены алгоритм и методология оценки функциональной надежности дороги, основанные на оценке долговечности и остаточного срока службы дорожного покрытия по критериям деформации: (1) максимально допустимый остаточный прогиб дорожного покрытия, (2) снижение модуля деформации материала дорожного покрытия в результате многократной упругопластической деформации под воздействием транспортного потока, (3) появление неприемлемых продольных выбоин и/или ям. **Методы.** Для определения вероятности отказа каждого участка дорожной сети разработан метод определения начальной надежности с учетом динамических воздействий (нагрузки от проезжающих транспортных средств), внешних (атмосферных) воздействий и человеческого фактора (нарушение способа укладки асфальтобетона) с использованием байесовских сетей в формате программного пакета GeNIe. Математическая модель дорожной сети в виде байесовской сети позволяет моделировать (1) климатические/погодные условия, (2) движение транспорта в реальном времени после аварии с использованием агентной модели, которая использует информацию о движении, накопленную посредством непрерывного мониторинга (включая видеокамеры и БПЛА), время в пути каждого транспортного средства и объем движения на каждой дороге. Надежность выбранной транспортной сети и вероятность отказа каждого ее участка были рассчитаны с использованием байесовской сети, а остаточный срок службы каждого участка дороги был рассчитан на основе деформационных критериев. **Результаты.** Проведен сравнительный анализ уязвимости дорожной сети Екатеринбург-Тюменского маршрута (Уральский федеральный округ) как для пассажирских, так и для грузовых перевозок, с учетом и без учета климатических изменений, характерных для Среднего Урала, на примере дорожно-транспортного происшествия, приведшего к частичному разрушению одного моста и перераспределению транспортных потоков. Результаты расчета остаточного ресурса, вероятности безотказной эксплуатации и надежности каждого участка сети этих дорог позволили выявить наиболее уязвимые участки дорожной сети Уральского федерального округа и объем необходимых ремонтных работ для поддержания их работоспособности. **Заключение.** Применение разработанной методики показало, что функциональная надежность Екатеринбург-Тюменского маршрута для регулярных перевозок составляет 99,55%, а для транспортных средств грузоподъемностью более 20 тонн – 98,47%. Использование агентной модели поведения водителей для оценки и анализа уязвимости транспортной сети Екатеринбург-Тюмень в случае обрушения моста показало, что продление маршрута из-за обрушения моста приводит к увеличению углеродного следа дорожной сети и негативному воздействию на окружающую среду.

Abstract. Aim. The paper examines the matter of accounting for the effect of climate change on the functional reliability of regional road networks. An algorithm and method for assessing the functional reliability of a road are proposed that are based on assessing the durability and residual life of the road surface structure according to deformation criteria: (1) the maximum permissible residual deflection of the road surface, (2) the decrease of the deformation modulus of the road surface material as a result of multiple elastic-plastic deformation of the road surface caused by traffic, (3) the emergence of unacceptable longitudinal potholes. **Methods.** The mathematical model of a road network in the form of a Bayesian network allows

simulating (1) climate/weather conditions, (2) real-time traffic following an accident using an agent-based model that uses traffic information accumulated through continuous monitoring (including surveillance cameras and drones), travel time of each vehicle, and traffic volume on each road. For the purpose of identifying the probability of failure of each section of the road network, a method was developed for determining the initial reliability that takes into account the effect of various factors of destruction of the road surface structure. The reliability of the selected transport network and the PoF of each of its sections were calculated using a Bayesian network, and the residual life of each road section was calculated based on deformation criteria. **Results.** A comparative analysis of the vulnerability of the road network of the Yekaterinburg-Tyumen route (Ural Federal District) for both passenger and freight transport was conducted, both taking into account the climate trends of the Middle Urals and otherwise, using the example of a traffic accident that resulted in a partial destruction of a single bridge and a redistribution of traffic flows. The identified residual life, the probability of failure-free operation and the reliability of each section of the road network allowed identifying the most vulnerable sections of the road networks of the Ural Federal District, as well as the scope of necessary repair activities. **Conclusion.** The application of the developed method also showed that the functional reliability of the Yekaterinburg-Tyumen route for regular transport is 99.55% and 98.47% for vehicles with a carrying capacity of over 20 tons. The use of an agent-based model of driver behaviour to assess and analyse the vulnerability of the Yekaterinburg-Tyumen transport network in the event of a bridge failure showed that the extension of the route due to a bridge failure leads to an increase in the carbon footprint of the road network and a negative impact on the environment.

Ключевые слова: функциональная надежность, транспортная сеть, изменение климата, долговечность, остаточный ресурс.

Keywords: functional reliability, transport network, climate change, durability, residual life.

Для цитирования: Тимашев С.А., Пономарев В.А. Влияние изменения климата на функциональную надежность авторанспортных сетей // Надежность. 2026. №2. С. 25-32. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-2-25-32>

For citation: Timashev S.A., Ponomarev V.A. The effect of climate change on the functional reliability of motor transport networks. *Dependability* 2026;2: 25-32. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-2-25-32>

Поступила: 20.12.2025 / **После доработки:** 10.01.2026 / **К печати:** 25.05.2026

Received on: 20.12.2025 / **Revised on:** 10.01.2026 / **For printing:** 25.05.2026

Введение

Проблема оценки надежности развитой автодорожной сети весьма актуальна, особенно в свете усложнения транспортно-логистических цепей, постоянного роста трафика перевозок, деградации дорожного полотна от воздействия транспорта, перепадов температур, неблагоприятных погодных условий, изменения климата, морозного пучения, землетрясений, селей, оползней, сходов лавин, разрушения и сноса мостов из-за паводков и наводнений, недостаточных средств на ремонт, и др.

Под функциональной надежностью (ФН) региональной автодорожной сети понимается надежность основного маршрута, для которого предназначена данная сеть. ФН основного маршрута равна произведению надежностей участков сети, которые его образуют.

В случае когда основной маршрут состоит из нескольких эквивалентных маршрутов, его надежность вычисляется по формуле:

$$R_{сети} = 1 - Q_1 * Q_2 * \dots * Q_n, \quad (1)$$

где Q_1, Q_2, \dots, Q_n – вероятности отказа путей числом n , составляющих основной маршрут.

Расчет надежности сети показывает, что чем большим количеством равнозначных путей организован выбранный маршрут, тем его надежность выше, соответственно, и выше надежность всей транспортной сети.

1. Математическая модель автодорожной сети

При оценке функциональности транспортной сети используется ее математическая модель, с помощью которой производится выбор маршрута каждым водителем транспортного средства, рассчитывается время в пути и транспортный поток на каждой дороге. Стационарное во времени распределение трафика находится из решения задачи оптимизации функционирования транспортной сети [7]:

$$\min Z(x) = \sum_i \int_0^{x_i} t_i(w) dw, \quad (2)$$

где x_i – объем трафика на дороге i ; t_i – время проезда по дороге i :

$$t_i(x_i) = t_0 \left(1 + \alpha \left[\frac{x_i}{C_0 * N_L} \right]^\beta \right), \quad (3)$$

где t_0 – время беспрепятственного проезда по i -ой дороге; C_0 – пропускная способность одной полосы движения; N_L – количество полос i -ой дороги; α и β – переменные параметры, определяемые как 3,0 и 4,0 соответственно для расчетных скоростей 20 км/ч и 30 км/ч и 4,5 соответственно для расчетной скорости 40 км/ч и выше [7].

Общее время проезда дороги определяется следующим образом:

$$C_i = \sum f_i(x_i) \delta_i, \quad (4)$$

где δ_i – логическая функция, показывающая, проходит ли выбранный маршрут по i -ой дороге.

2. Моделирование транспортного трафика в реальном времени после ДТП с помощью агент-ориентированной модели

Агентное моделирование – мощный метод анализа распределенных сложных систем, подходящий для моделирования систем при трех условиях: проблемная область пространственно распределена; подсистемы существуют в динамической среде; подсистемы должны взаимодействовать друг с другом с большей гибкостью [7].

3. Инициализация агент-ориентированной модели [7]

При непрерывном мониторинге дорожного движения (в том числе, с помощью видеокамер и дронов) накапливается информация о времени в пути каждого транспортного средства и объеме транспортного потока на каждой дороге транспортной сети. При этом число автомобилей на каждой дороге I_i , составляет:

$$I_i = x_i * t_i. \quad (5)$$

Вероятность того, что отдельный автомобиль на i -ой дороге будет иметь определенный маршрут k между исходной точкой r и пунктом назначения s , составляет [7]:

$$P_{i,rs} = \frac{\sum_{k \in \Psi_{rs}} f_k^{rs} \delta_i}{x_i}, \quad (6)$$

где f_k^{rs} – объем трафика k -ого маршрута между исходной точкой r и пунктом назначения s ; Ψ_{rs} – набор всех маршрутов между r и s .

С помощью уравнения (6) каждому автомобилю на i -ой дороге направление движения назначается случайным образом. Вероятность того, что отдельная машина с назначенным определенным направлением движения r - s будет проезжать по определенному маршруту r - t , равна [7]:

$$P_{i,rt}^{rs} = \frac{f_{rt}^{rs} \delta_{i,rt}}{\sum_{k \in \Psi_{rs}} f_k^{rs} \delta_i}. \quad (7)$$

С помощью уравнения (7) каждому автомобилю на i -ой дороге случайным образом назначается маршрут движения. Предполагая, что автомобили равномерно распределены по дорогам (звеньям транспортной сети), время, за которое j -ый автомобиль в очереди дойдет до перекрестка между звеньями, равно [7]:

$$t_{j,a} = t_i(x_i) * \frac{j}{I_i}. \quad (8)$$

4. Алгоритм оценки долговечности дорожного покрытия

Под долговечностью дорожного покрытия (ДДП) обычно понимается время, в течение которого оно сохраняет свои основные свойства на уровне, удовлетворяющем требованиям эксплуатации.

В настоящее время для оценки ДДП конкретного участка дорожной сети задается начальная надежность (вероятность безотказной работы при нормативных средних значениях параметров прочности и жесткости автодорожного покрытия (ДП)).

С позиций теории надежности автомобильная дорога – восстанавливаемая система. Поскольку аналитический расчет восстанавливаемых сетевых систем не разработан, в межремонтное время автодорога рассчитывается как невосстанавливаемая система [4].

Элементы невосстанавливаемых систем с точки зрения долговечности имеют следующие показатели [4]:

$P(t)$ – 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 надежность элемента (вероятность безотказной работы при нормативных средних значениях параметров прочности и жесткости автомобильной дороги).

Между показателями долговечности существуют следующие зависимости [4]:

$$P(t) = P_0 e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}, \quad (9)$$

$$T_0 = \int_0^\infty P(t) dt. \quad (10)$$

Данные выражения показывают, что исходной функцией в расчете долговечности является интенсивность отказов.

Для определения долговечности (среднего времени безотказной работы) дорожного покрытия применяется закон распределения Вейбулла:

$$\lambda(t) = \alpha \lambda t^{(\alpha-1)} \rightarrow P(t) = P_0 e^{-\lambda t^\alpha} \rightarrow T_0 = P_0 \int_0^\infty e^{-\lambda t^\alpha} dt. \quad (11)$$

Существующая методика определения долговечности является необъективной, так как при расчете

начальная надежность ДП задается из нормативных документов. Для объективной оценки долговечности необходимо произвести расчет вероятности безотказной работы дорожного покрытия на каждом участке дорожной сети.

В качестве случайных величин для оценки долговечности дорожного покрытия принимаются модули упругости $E_{общ}$ и $E_{мин}$ [5].

Надежность асфальтобетонного ДП как нежесткой дорожной одежды определяется по допускаемому упругому прогибу:

$$E_{общ} \geq E_{мин} \cdot K_{пр.треб}, \quad (12)$$

где $E_{общ}$ – общий расчетный модуль упругости конструкции ДП (КДП), МПа; $E_{мин}$ – минимальный требуемый общий модуль упругости ДП, МПа; $K_{пр.треб}$ – требуемый коэффициент прочности ДП по критерию упругого прогиба, $K_{пр.треб} = 1,17$ [2].

Величина минимального требуемого общего модуля деформации КДП вычисляется по эмпирической формуле [5]:

$$E_{мин} = 98,65 \cdot [\lg(\sum N_p) - c], \text{ МПа}, \quad (13)$$

где $\sum N_p$ – суммарное расчетное число приложений нагрузки за срок службы ДП; c – эмпирический параметр, принимаемый для разных нагрузок на ось транспортного средства. Для максимальной расчетной нагрузки на ось 100 кН (при облегченном типе ДП) $c = 3,55$.

Для определения долговечности для каждого участка дорожной сети необходимо определить величину минимального требуемого общего модуля деформации КДП $E_{мин}$. Для этого необходимо вычислить суммарное расчетное число приложений нагрузки за срок службы ДП на каждом участке сети согласно [3], в следующей последовательности.

Вначале определяется перспективная интенсивность движения на конец межремонтного периода $N_{пер}$, по формуле [3]:

$$N_{пер} = N_{исх.} \left(1 + \frac{p}{100} \right)^t, \quad (14)$$

где $N_{исх.}$ – исходная интенсивность движения, авт./сут; p – ежегодный прирост интенсивности движения, %; t – перспективный период, годы.

Затем определяется приведенная к расчетному двухосному автомобилю интенсивность движения N_p [3]:

$$N_p = f_{пол} \sum_{m=1}^n N_m * S_{m,сум} \text{ груз. ед./сут}, \quad (15)$$

где $f_{пол}$ – коэффициент, учитывающий число полос движения и распределение движения по ним; n – общее число различных марок транспортных средств в составе транспортного потока; N_m – интенсивность движения транспортных средств m -ой марки (число проездов в сутки в обоих направлениях транспортных средств m -ой

марки); $S_{m,сум}$ – суммарный коэффициент приведения воздействия на дорожную одежду транспортного средства m -й марки [3].

Коэффициент многополосности $f_{пол}$ назначают по таблице 3.2 [3]. Номер полосы проезжей части отсчитывается справа по ходу движения автомобилей в одном направлении. Для двухполосных дорог $f_{пол} = 0,55$.

Далее находят суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки к точке на поверхности полотна дороги за срок службы по формуле [3]:

$$\sum N_p = 0,7 \cdot N_p \frac{K_c}{q^{(T_{сл}-1)}} \cdot T_{рлг} \cdot K_n, \quad (16)$$

где q – показатель изменения интенсивности движения по годам; $T_{сл}$ – расчетный срок службы; K_c – коэффициент суммирования; $T_{рлг}$ – расчетное число дней в году, соответствующих определенному состоянию деформируемости полотна дороги; K_n – коэффициент, учитывающий вероятность отклонения суммарного движения от среднего ожидаемого.

Расчетный срок службы $T_{сл}$ задают по таблице П6.2 [3].

Коэффициент суммирования K_c определяют по формуле [3]:

$$K_c = \frac{q^{T_{сл}} - 1}{q - 1}. \quad (17)$$

Для Западной Сибири расчетное число дней в году, соответствующих определенному состоянию деформируемости полотна дороги принимается $T_{рлг} = 130$ дней [3].

Коэффициент k_n , учитывающий вероятность отклонения суммарного движения от среднего ожидаемого находят по таблице 3.3 [3].

Имея данные по минимальному и общему расчетному модулю деформации ДП каждого участка дороги, можно определить [4,5]:

Среднее значение резерва несущей способности:

$$\bar{g} = \overline{E_{общ}} - \overline{E_{мин}}, \quad (18)$$

где $\overline{E_{общ}}$ – среднее значение общего расчетного модуля деформации КДП; $\overline{E_{мин}}$ – среднее значение минимально требуемого общего модуля деформации КДП.

Дисперсия резерва несущей способности:

$$S_g^2 = S_{E_{общ}}^2 + S_{E_{мин}}^2, \quad (19)$$

где $S_{E_{общ}}^2$ – дисперсия общего расчетного модуля деформации КДП; $S_{E_{мин}}^2$ – дисперсия минимально требуемого общего модуля деформации КДП.

Среднеквадратичное отклонение резерва несущей способности:

$$S_g = \sqrt{S_g^2} \quad (20)$$

где S_g^2 – дисперсия резерва несущей способности.

Индекс надежности:

$$\beta = \frac{\bar{g}}{S_g}, \quad (21)$$

где \bar{g} – среднее значение резерва несущей способности; S_g – среднеквадратичное отклонение резерва несущей способности.

И, наконец, вероятность безотказной работы, т.е. показатель надежности КДП:

$$P(\bar{g} \geq 0) = 0,5 + \Phi(\beta), \quad (22)$$

где $\Phi(\beta)$ – значение функции Лапласа, показывающее вероятность попадания случайной величины, распределенной по нормальному закону, в заданный интервал.

Для определения средних значений модулей деформации используются коэффициенты вариации:

$$\overline{E_{общ}} = \frac{E_{общ}}{(1 - C_{E_{общ}})}; \overline{E_{мин}} = \frac{E_{мин}}{(1 + C_{E_{мин}})}, \quad (23)$$

где $C_{E_{общ}}$ – коэффициент вариации общего расчетного модуля деформации КДП, $C_{E_{общ}} \leq 0,2$; $C_{E_{мин}}$ – коэффициент вариации минимально требуемого модуля деформации КДП, $C_{E_{мин}} \leq 0,2$.

Дисперсии модулей деформации также определяются с помощью коэффициентов вариации [5]:

$$S_{E_{общ}}^2 = (C_{E_{общ}} * \overline{E_{общ}})^2; S_{E_{мин}}^2 = (C_{E_{мин}} * \overline{E_{мин}})^2. \quad (24)$$

5. Пример применения методологии к автодорожным сетям УрФО

Для оценки надежности и долговечности дорожного покрытия выбрана сеть автомобильных дорог (рис. 1), находящаяся на территории Свердловской, Тюменской и Курганской областей Уральского федерального округа (УрФО), которая обеспечивает наземным сообщением две областные столицы: Екатеринбург (миллионник) и Тюмень.

По дорожно-климатическому районированию автомобильная вся выбранная сеть расположена во 2-ой дорожно-климатической зоне, II подзоне, и поделена на следующие участки:

1) Главная трасса Р-351 направление Екатеринбург-Тюмень через промежуточные населенные пункты: Белоярский – Богданович – Камышлов – Пышма – Талица – Тугулым – Успенка (протяженность 330 км). Интенсивность движения – 7980 авт./сут.

2) Северное второстепенное направление Екатеринбург-Тюмень через промежуточные населенные пункты: Артемовский – Зайково – Ирбит – Туринск – Тавда – Велижаны (протяженность 500 км). Интенсивность движения – 5100 авт./сут.

3) Южное второстепенное направление Екатеринбург-Тюмень через промежуточные населенные пункты: Каменск-Уральский – Катайск – Далматово – Мехонское

– Исетское (протяженность 432 км). Интенсивность движения – 6520 авт./сут.

4) Направление Рефтинский – Асбест – Белоярский (протяженность 57 км). Интенсивность движения – 450 авт./сут.

5) Направление Рефтинский – Сухой Лог – Богданович (протяженность 61 км). Интенсивность движения – 690 авт./сут.

6) Направление Зайково – Камышлов (протяженность 81 км). Интенсивность – движения – 750 авт./сут.

7) Направление Ирбит – Байкалово – Талица (протяженность 110 км). Интенсивность движения – 800 авт./сут.

8) Направление Туринская Слобода – Тюмень (протяженность 110 км). Интенсивность движения – 2100 авт./сут.

9) Направление Байкалово – Туринская Слобода (протяженность 49 км). Интенсивность движения – 1000 авт./сут.

10) Направление Артемовский – Буланаш – автодорога Зайково-Камышлов (протяженность 73 км). Интенсивность движения – 400 авт./сут.

11) Направление Белоярский – Каменск-Уральский (протяженность 72 км). Интенсивность движения – 600 авт./сут.

12) Направление Камышлов – Далматово (протяженность 80 км). Интенсивность движения – 550 авт./сут.

13) Направление Шатрово – автодорога южного направления Екатеринбург – Тюмень (протяженность 22 км). Интенсивность движения – 300 авт./сут.

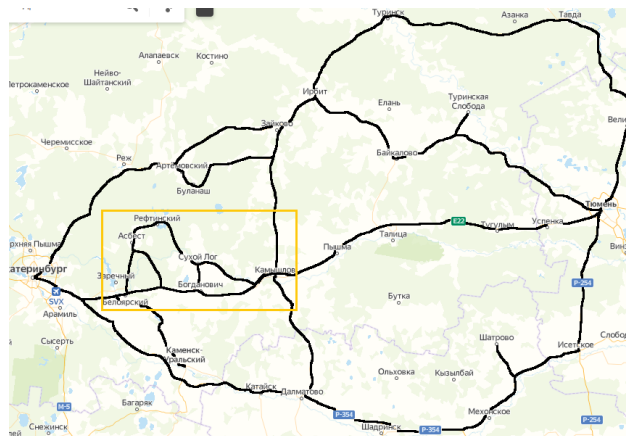


Рис. 1. Основная дорожная сеть с выделенной зоной сети второстепенных автодорог в УрФО

По приведенной выше методике произведен расчет всех необходимых параметров износа ДП каждого участка автодорожной сети, результаты которых показаны в работе [13].

По полученным результатам вычислена начальная надежность Р (вероятность безотказной работы конструкции ДП в момент начала эксплуатации дороги после очередного ремонта) каждого участка дорожной сети, которая необходима для вычисления ДДП.

Из основной дорожной сети выделен прямоугольник 100x50 км, в котором отображены все второстепенные дороги, примыкающие к основной сети (см. рис.). Сеть второстепенных дорог имеет 30 узлов и 37 звеньев.

Для оценки максимально возможного влияния ДТП на пропускную способность основного маршрута исследуемой автодорожной сети было смоделировано дорожно-транспортное происшествие в 9:00 (когда вся транспортная сеть максимально загружена транспортными средствами) на главной трассе Р-351 направления Екатеринбург-Тюмень в н.п. Грязновское, с участием бензовоза, приведшее к возникновению пожара и взрыву, с последующим разрушением мостового сооружения, что сделало невозможным дальнейшее передвижение автомобилей по данной дороге до момента полного восстановления моста [13].

Использование агент-ориентированной модели для анализа последствий аварии показало, что ДТП привело к существенному снижению скорости передвижения транспортных средств и их скоплению, которое напрямую зависит от скорости движения автомобилей. Средняя скорость движения потока при нормальном функционировании транспортной сети составляет 57,5 км/ч [11].

Разрушение моста в результате ДТП и невозможность проезда по данному участку дороги привели к удлинению пути по главной трассе Р-351 на 85 км (с учетом объездных путей). Максимальное время объезда разрушенного участка дороги по объездным путям $t_1 = S/V = 85/30 = 2,8$ ч, где S – длина объездного пути, км; V – средняя скорость движения по объездному пути, км/ч.

Длина объезжаемого участка дороги равна 39 км. При условии полной работоспособности данного участка дороги время проезда по нему t_2 со средней скоростью 57,5 км/час равно 0,7 часа. Временные потери при объезде разрушенного участка дороги $\Delta t = t_1 - t_2 = 2,8 - 0,7 = 2,1$ час. Таким образом, время в пути по трассе Р-351 направления Екатеринбург-Тюмень при разрушении моста в н.п. Грязновское увеличивается на 2,1 часа.

Для более точного расчета вероятности разрушения дорожного покрытия и времени до следующего ремонта необходимо учитывать все факторы, влияющие на износ ДП. В связи с этим необходимо проанализировать влияние каждого события на вероятность наступления отказа КДП. Одним из перспективных методов оценки и прогнозирования отказа какой-либо системы с большим количеством причинно-следственных связей между событиями являются сети Байеса (БС). БС представляют собой графические модели, которые описывают вероятностные отношения между набором переменных. Формально они являются ориентированными ациклическими графами (DAG), узлы которых представляют переменные, относящиеся к системе, а дуги направленного действия представляют вероятностные зависимости между переменными [12].

Моделирование системы с причинно-следственными связями позволяет глубже понять основные механизмы ее деградации и изучать, как внешние вмешательства влияют на систему. В данной статье для этой цели был использован ПК «GeNIeModeler» (далее «GeNIe»). В качестве факторов, влияющих на вероятность отказа ДП, в данной работе приняты ударные воздействия, внешние воздействия, механические повреждения и человеческий фактор.

При построении модели БС для определения вероятности разрушения КДП необходимо понимание обстоятельств, приводящих к разрушению объекта. Ввиду слабо развитой системы мониторинга дорожных сетей необходимая статистика разрушений ДП отсутствует, поэтому условные вероятности наступления отказа КДП заданы экспертно.

Вероятности отказа (ВО) КДП на каждом участке автодорожной сети до времени следующего капитального ремонта с использованием ПК «GeNIe» представлены в работе [13].

По полученным результатам наибольшую ВО конструкции дорожного полотна имеет участок автодорожной сети №9 (31,76%) направления Байкалово – Туринская Слобода.

Сообщение между Екатеринбургом и Тюменью обеспечивается шестью путями с соответствующими вероятностями отказа Q :

- 1) главная трасса Р-351 ($Q = 28,18\%$);
- 2) северное направление Екатеринбург-Тюмень ($Q = 28,75\%$);
- 3) южное направление Екатеринбург-Тюмень ($Q = 29,43\%$);
- 4) северное направление через населенные пункты Байкалово и Туринская слобода ($Q = 48,13\%$);
- 5) северное направление через населенные пункты Зайково и Камышлов с выездом на главную трассу Р-351 ($Q = 63,97\%$);
- 6) главная трасса Р-351 через населенные пункты Камышлов и Далматово с выездом на дорогу южного направления ($Q = 61,3\%$).

Надежность рассматриваемой транспортной сети в этом случае равна:

$$R_{\text{сети}} = 1 - 0,2818 \cdot 0,2875 \cdot 0,2943 \cdot 0,4813 \cdot 0,6397 \cdot 0,613 = 0,9955. \quad (25)$$

Необходимо отметить, что не все шесть маршрутов могут обеспечить бесперебойное движение большегрузных транспортных средств грузоподъемностью более 20 тонн. Это связано с тем, что некоторые маршруты ввиду недостаточной ширины проезжей части и наличия слабых мест (мостов с пониженной грузоподъемностью) не могут пропустить через себя транспортные средства большой грузоподъемности. По этим причинам маршруты № 4 и 6 не могут обеспечить передвижение транспортных средств грузоподъемностью более 20 тонн, поэтому надежность транспортной сети по маршруту

Екатеринбург-Тюмень в таком случае будет определяться четырьмя путями:

- 1) главная трасса Р-351 ($Q = 28,18\%$);
- 2) северное направление Екатеринбург-Тюмень ($Q = 28,75\%$);
- 3) южное направление Екатеринбург-Тюмень ($Q = 29,43\%$);
- 4) северное направление через населенные пункты Зайково и Камышлов с выездом на главную трассу Р-351 ($Q = 63,97\%$);

Надежность сети относительно большегрузных транспортных средств равна:

$$R_{сети} = 1 - 0,2818 \cdot 0,2875 \cdot 0,2943 \cdot 0,6397 = 0,9847. \quad (26)$$

Расчет надежности сети показывает, что чем большим количеством путей организован выбранный маршрут, тем его надежность выше, соответственно, и выше надежность всей транспортной сети.

Результаты расчета остаточного ресурса (в годах) каждого участка рассматриваемой автодорожной сети по критерию снижения модуля деформации КДП (образование ям на проезжей части) представлены в работе [13]. Предельно допустимый (критический) размер ямы на проезжей части: длина – 60 см, ширина – 15 см, глубина – 5 см.

Одним из видов отказа КДП является образование колеи на проезжей части, так как данное событие также является следствием снижения модуля деформации КДП во время эксплуатации. В работе [13] представлен расчет остаточного ресурса каждого участка транспортной сети по критерию образования продольной колеи, глубина которой превышает предельно допустимое значение, равное 35 мм.

Заключение

В статье предложена методика расчета долговечности и остаточного ресурса по критериям образования ям и продольной колеи в дорожном покрытии, и надежности региональной сети автодороги по допускаемому остаточному прогибу, возникающему из-за снижения приведенного модуля деформации КДП в результате многочисленной упруго-пластической деформации ДП под действием трафика.

Для определения ВО каждого участка дорожной сети разработана методика определения начальной надежности (вероятности безотказной работы, ВБР) с учетом ударных воздействий (нагрузки на ДП от проезжающих транспортных средств), внешних (атмосферных) воздействий и человеческого фактора (нарушение методики укладки асфальтобетона), с использованием Байесовских сетей в формате ПК «GeNie».

Применение разработанной методики к оценке функциональной надежности маршрута Екатеринбург-Тюмень, возможного шестью путями, показало, что его надежность для обычного транспорта равна 99,55%, а

для транспортных средств грузоподъемностью более 20 тонн равна 98,47%.

Использование агент-ориентированной модели поведения водителей для оценки и анализа уязвимости транспортной сети Екатеринбург-Тюмень УрФО при отказе главной дороги из-за аварийного разрушения моста показало, что чем сильнее развита транспортная сеть, тем она робастнее.

Самыми уязвимыми участками транспортной сети Екатеринбург-Тюмень с точки зрения износа дорожного покрытия являются участок сети №9 направления Байкалово – Туринская Слобода (ВБР 68,24%, минимальный срок безотказной работы 4,5 года по критерию образования ям) и участок сети №10 направления Артемовский – Буланаш (время образования продольной колеи 4,39 года, при вероятности отказа 68,42%).

Список литературы

1. Баринев Е.Н. Оценка и прогнозирование долговечности дорожных асфальтобетонных покрытий: Учеб. Пособие. СПб.: Инж.-строит. Ин-т СПб, 1993. 66 с.
2. ОДН 218.1.052-2002 Отраслевые дорожные нормы. Оценка прочности нежестких дорожных одежд. М.: 2002. 60 с.
3. ОДН 218.046-01 Отраслевые дорожные нормы. Проектирование нежестких дорожных одежд. М.: 2001. 99 с.
4. Моисеенко Р.П., Ефименко В.Н. К оценке долговечности автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 3. С. 207–213.
5. Моисеенко Р.П., Пушкарева Г.В., Акимов Б.Г. Расчет надежности нежестких дорожных одежд методом моментов по критерию допускаемого прогиба // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 6. С. 220-226.
6. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.В. Сильянов, Э.Р. Домке. 2-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 352 стр.
7. Feng K., Li Q., Ellingwood B.R. Post-earthquake modelling of transportation networks using an agent-based model // Structure and Infrastructure Engineering. 2020. DOI: 10.1080/15732479.2020.1713170
8. Тимашев С.А., Бушинская А.В., Малюкова М.Г. и др. Целостность и безопасность трубопроводных систем. Екатеринбург: УрО РАН, 2013. 590 с.
9. Описание района строительства [Электронный ресурс]. URL: https://studbooks.net/2441945/tehnika/opisanie_rayona_stroitelstva (Дата обращения 30.04.2021).
10. Критерии надежности дорожной одежды [Электронный ресурс]. URL: https://road-project.okis.ru/files/8/3/6/836/DO/5_DO_Nadezjnost.pdf (Дата обращения 07.02.2021).

11. ОДМ 218.2.020-2012 Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог. М.: 2012. 148 с.

12. Тулупьев А.Л. Байесовские сети: Логико-вероятностный подход. СПб.: Наука, 2006. 607 с.

13. Пономарев В.А. Мейтенанс сети автодорог региона по критерию риска на основе цифрового мониторинга их нагруженности и износа : магистерская дис. ... / В.А. Пономарев. Екатеринбург, 2021. 123 с.

References

1. Barinov E.N. [Assessing and predicting the durability of asphalt concrete road surfaces: a textbook]. St. Petersburg: St. Petersburg Engineering and Construction Institute; 1993. (In Russ.)

2. [ODN 218.1.052-2002 Industry road standards. Strength assessment of flexible road surfaces]. Moscow: 2002. (In Russ.)

3. [ODN 218.046-01 Industry road standards. Design of flexible road surfaces]. Moscow: 2001. (In Russ.)

4. Moiseenko R.P., Efimenko V.M. [Towards durability of automobile roads]. *Journal of Construction and Architecture* 2019;21(3):207-213. (In Russ.)

5. Moiseenko R.P., Pushkaryova G.V., Akimov B.G. Reliability analysis of flexible pavements using moments method and bending strain criterion. *Journal of Construction and Architecture* 2017;6:220-226. (In Russ.)

6. Silyanov V.V., Domke E.R. [Transport and operational qualities of motorways and city streets: a textbook for higher educational institutions. 2-nd ed., reprinted]. Moscow: Publishing Centre Academy; 2008. (In Russ.)

7. Feng K., Li Q., Ellingwood B.R. Post-earthquake modelling of transportation networks using an agent-based model. *Structure and Infrastructure Engineering*; 2020. DOI: 10.1080/15732479.2020.1713170.

8. Timashev S.A., Bushinskaya A.V., Malyukova M.G. et al. [Integrity and safety of pipeline systems]. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2013. (In Russ.)

9. [Description of a construction site]. (accessed: 30.04.2021). Available at: https://studbooks.net/2441945/tehnika/opisanie_rayona_stroitelstva. (In Russ.)

10. [Dependability criteria of road surfaces]. (accessed: 07.02.2021). Available at: https://road-project.okis.ru/files/8/3/6/836/DO/5_DO_Nadezhnost.pdf. (In Russ.)

11. [ODM 218.2.020-2012 Industry road guidance document. Guidelines for assessing the capacity of motorways]. Moscow; 2012. (In Russ.)

12. Tulupyev A.L. [Bayesian networks: a probabilistic logic-based approach]. St. Petersburg: Nauka; 2006. (In Russ.)

13. Ponomarev V.A. [Risk-based maintenance of a regional road network based on digital monitoring of its loading and wear : a master's dissertation]. Yekaterinburg; 2021. (In Russ.)

Сведения об авторах

Тимашев Святослав Анатольевич – доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, научный руководитель и главный научный сотрудник Научно-инженерного центра «Надежность и ресурс больших систем и машин» УрО РАН, профессор кафедры САПРОС Института строительства и архитектуры Уральского федерального университета, Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: timashevs@gmail.com

Пономарев Василий Анатольевич – аспирант Научно-инженерного центра «Надежность и ресурс больших систем и машин» УрО РАН, инженер-проектировщик ООО «Геотехпроект», Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: wasilko@rambler.ru

About the authors

Sviatoslav A. Timashev, Doctor of Engineering, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Scientific Director and Principal Scientist, Research and Engineering Centre Reliability and Service Life of Large-Scale Systems and Machines, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Professor, SAPROS Department, Institute of Construction and Architecture, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation, e-mail: timashevs@gmail.com

Vasilii A. Ponomarev, Postgraduate Student, Research and Engineering Centre Reliability and Service Life of Large-Scale Systems and Machines, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Design Engineer, Geotekhprouekt Limited Liability Company, Yekaterinburg, Russian Federation, e-mail: wasilko@rambler.ru

Вклад авторов в статью

Тимашев Святослав Анатольевич. Разработка идеи исследования надежности и уязвимости автотранспортных систем на основе следующих факторов риска: влияние суровых климатических условий, систематические динамические воздействия и человеческий фактор.

Пономарев Василий Анатольевич. Описание и структурирование методов исследования, выполнение расчетов с последующим описанием полученных результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.