

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ НЕЖЕСТКОЙ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ

Батракова А. Г., Урдзик С. Н.

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Разработана модель оценки состояния дорожной одежды, опирающаяся на положения теории надежности конструкций дорожных одежд и теории риска. Изложенный подход позволяет установить связь между индексом технического состояния конструкции и надежностью дорожной одежды, исследовать закономерности изменения надежности конструкции дорожной одежды в зависимости от коэффициентов вариации показателей ее состояния, оценить надежность дорожной одежды по результатам диагностики.

Ключевые слова: конструкция дорожной одежды, оценка состояния, надежность, индекс технического состояния, коэффициент вариации.

Введение

Основным подходом к проектированию нежестких дорожных одежд является механико-эмпирический подход [1, 2], предполагающий анализ напряжений, деформаций и прогибов с целью оценки усталостного трещинообразования в слоях из монолитных материалов и деформаций в грунтах земляного полотна и слоях из несвязанных материалов [1]. Современные методы проектирования асфальтобетонного покрытия нежесткой дорожной одежды, отраженные в нормативных документах, используют только два критерия: усталостное разрушение и деформацию от действия циклической нагрузки [3–5]. Эта методология, разработанная в 1965 году, представляет собой значительное упрощение режима работы нежестких дорожных одежд. Одним из основных недостатков существующей методологии проектирования нежесткой дорожной одежды является использование начальных свойств материалов и геометрических параметров слоев конструкции для прогнозирования срока службы дорожных покрытий. Анализ состояния дорожного покрытия, оценка свойств материалов конструктивных слоев дорожной одежды с учетом изменения интенсивности движения и климатических условий во времени практически не находят отражения в нормативных документах по проектированию нежестких дорожных одежд.

Анализ публикаций

Концепция вероятностного проектирования дорожной одежды была сформулирована еще в 1970-х годах [6–8]. На ее основании были разработаны различные подходы, свя-

занные с вероятностными методами проектирования [9–12]. При этом большая часть исследований была посвящена проектированию новой нежесткой дорожной одежды [13–16]. Большинство исследований ограничивались оценкой надежности срока службы дорожного покрытия или его характеристикой [10, 16]. Авторы исследования [17–19] подчеркивают необходимость разработки моделей количественной оценки накопления разрушений и деформаций дорожной одежды в течение срока службы, которые будут опираться на вероятностный анализ, как инструмент оценки взаимного влияния разрушений и деформаций, учета изменения физических и механических свойств, вариации толщины конструктивных слоев в течение срока службы. Вероятностные методы анализа надежности проектных решений позволят учитывать влияние неопределенности и изменения параметров конструкции [20]. В этом контексте вероятностный анализ должен являться одной из целей проектирования дорожной одежды, что позволит учитывать взаимодействие между различными формами износа и изменчивости физических и механических свойств в течение срока службы дорожной одежды [17–19]. В [21] обосновано, что внутренняя изменчивость, статистическая неопределенность и неопределенность модели являются источниками изменчивости при проектировании дорожного покрытия [21]. Использование случайных величин в качестве исходных данных позволяет учитывать неоднородность физико-механических и геометрических параметров материалов слоев дорожной одежды, изменчивость климатических условий и транспортной нагрузки. Как отмечают авторы работы [22], при про-

ектировании дорожного покрытия необходимо учитывать принципы надежности, в том числе вероятностные методы анализа надежности.

Цели и постановка задачи

Сложность оценки состояния дорожных одежд, находящихся в эксплуатации, связана со значительной неоднородностью их геометрических и физико-механических параметров, а следовательно, и интегральной оценки даже на незначительных по протяженности участках. Поэтому целью данной статьи является разработка модели оценки состояния дорожной одежды, опирающейся на положения теории надежности [23] и теории риска [24, 25].

Модель оценки состояния дорожной одежды

Надежность является мерой адекватности проекта и рассматривается как вероятность безотказной работы конструкции, при которой не будет превышено предельное состояние. Математически, надежность может быть представлена в следующем виде [26]:

$$H = 1 - P(S \leq 0), \quad (1)$$

где S – запас прочности, определяемый как разница между сопротивляемостью конструкции и действующей нагрузкой.

Будем трактовать надежность как вероятность безотказной работы дорожной одежды по интегральному показателю (TCI) – индексу технического состояния конструкции дорожной одежды, являющегося показателем соответствия конструкции дорожной одежды критериям прочности [27, 28]:

$$TCI = 100 \times \left[\frac{\sum_{i=1}^3 \alpha_i \times f_i}{\sum_{i=1}^3 \alpha_i} \right], \quad (2)$$

где α_i – весовой коэффициент i -го критерия предельного состояния; f_i – показатель состояния по i -му критерию предельного состояния конструкции.

Показатели состояния конструкции и соответствующие им весовые коэффициенты определяются следующим образом [27]:

$$f_i = \frac{K_i}{K_{i\max}}; \quad \alpha_i = \frac{K_{i\max}}{K_{i\min}}, \quad (3)$$

где $K_i, K_{i\max}, K_{i\min}$ – коэффициент запаса прочности по i -му критерию предельного состояния, соответственно, фактический, максимальный, минимально допустимый.

Вычислим уровень надежности [29]:

$$H = \int_{TCI_{\min}}^{TCI_{\max}} f(TCI) dTCI, \quad (4)$$

где TCI_{\max}, TCI_{\min} – максимальное и минимально допустимое значение индекса технического состояния дорожной одежды, по которому оценивается уровень надежности конструкции дорожной одежды; $f(TCI)$ – функция распределения параметра.

Поскольку большинство свойств материалов и конструкций, а также напряжения в конструкциях подчиняются нормальному закону распределения [23, 29], полагаем, что индекс технического состояния дорожной одежды также подчиняется нормальному закону распределения. Для определения вероятности разрушения введем случайную величину, называемую резервом (запасом) безопасности (S) [26]. Предположив, что характеристикой прочности конструкции является предельное значение индекса технического состояния ($R = TCI_{ep}$), а характеристикой действующей нагрузки является фактический индекс технического состояния ($Q = TCI_{\phi}$), получим

$$S = R - Q = TCI_{ep} - TCI_{\phi}, \quad (5)$$

где S – запас прочности; R – характеристика прочности конструкции; Q – характеристика нагрузки, которая действует на конструкцию; TCI_{ep} – предельный индекс технического состояния конструкции; TCI_{ϕ} – фактический индекс технического состояния конструкции.

Полагаем, что R и Q – взаимно независимые случайные величины, подчиняющиеся нормальному закону распределения. Поскольку R и Q нормально распределены, запас безопасности S также подчиняется нормальному закону распределения со средним значением $\bar{S} = \bar{R} - \bar{Q}$ и среднеквадратическим отклонением $\sigma_S = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}$.

Конструкция удовлетворяет требованиям прочности, если $S \leq 0$. Тогда вероятность разрушения конструкции согласно [26]

$$P(S) = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{S-0}{\sigma_S}\right) = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{S}{\sigma_S}\right) = \frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{-S}{\sigma_S}\right) = \frac{1}{2} - \Phi(\beta), \quad (6)$$

где $\Phi(\beta)$ – нормированная функция Лапласа;

$$\Phi(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\beta} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz, \quad (7)$$

где β – характеристика безопасности.

Перепишем полученное равенство с учетом (5):

$$P(TCI) = \frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{-(TCI_{zp} - TCI_{\phi})}{\sigma_S}\right) = \frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{TCI_{\phi} - TCI_{zp}}{\sqrt{(\sigma_{\phi})^2 + (\sigma_{zp})^2}}\right), \quad (8)$$

где

$$\beta = \frac{TCI_{\phi} - TCI_{zp}}{\sqrt{(\sigma_{\phi})^2 + (\sigma_{zp})^2}}, \quad (9)$$

где TCI_{ϕ}, TCI_{zp} – фактический и предельно допустимый индекс технического состояния конструкции; $\sigma_{\phi}, \sigma_{zp}$ – среднеквадратическое отклонение фактического (TCI_{ϕ}) и предельного (TCI_{zp}) индекса технического состояния конструкции.

Тогда надежность можно представить в следующем виде [26]:

$$H(TCI) = 1 - P(TCI) = 0,5 + \Phi(\beta) = 0,5 + \Phi\left[\frac{TCI_{\phi} - TCI_{zp}}{\sqrt{(\sigma_{\phi})^2 + (\sigma_{zp})^2}}\right]. \quad (10)$$

Среднеквадратическое отклонение предельного индекса технического состояния конструкции определяется по формуле

$$\sigma_{zp} = CV_{zp} \cdot TCI_{zp}, \quad (11)$$

где CV_{zp} – коэффициент вариации предельного индекса технического состояния.

Среднеквадратическое отклонение фактического индекса технического состояния конструкции определяется по формуле

$$\sigma_{\phi} = CV_{\phi} \cdot TCI_{\phi}, \quad (12)$$

где CV_{ϕ} – фактический коэффициент вариации индекса технического состояния, определяемый в соответствии с формулами математической статистики:

$$CV_{\phi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (TCI_i - \overline{TCI})^2}{n-1}} / \overline{TCI}, \quad (13)$$

где \overline{TCI} – математическое ожидание (среднее значение) индекса технического состояния конструкции на исследуемом участке:

$$\overline{TCI} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n TCI_i, \quad (14)$$

где n – общее количество оценок, полученное по результатам диагностики; TCI_i – значения TCI на i -м участке.

Предполагается, что коэффициент вариации $CV_{zp} = CV_{\phi}$, то есть дорожная одежда с предельным значением индекса технического состояния, должна обладать той же однородностью, что и дорожная одежда с фактическим индексом технического состояния. Как показано в работе [24], только в этом случае показатели TCI_{zp} и TCI_{ϕ} будут сопоставимыми (принадлежать к одной совокупности).

Анализ формулы (8) показывает:

- при $TCI_{\phi} = TCI_{zp}$ вероятность разрушения составляет $P(TCI) = 0,5$;
- при $TCI_{\phi} > TCI_{zp}$ вероятность разрушения $P(TCI) \xrightarrow{TCI} 0$;
- при $TCI_{\phi} < TCI_{zp}$ вероятность разрушения $P(TCI) \xrightarrow{TCI} 1$.

Предельные значения показателей состояния дорожной одежды

Риск разрушения определяем путем суммирования распределения индекса технического состояния конструкции (TCI) с распределением индекса технического состоя-

ния дорожной одежды, находящейся в предельном состоянии (TCl_{zp}). Тогда предельное значение риска разрушения в терминах задачи определяется [26] следующим образом:

$$R_{zp}(TCl) = 0,5 - \Phi \left[\frac{TCl_{max} - TCl_{zp}}{\sqrt{(\sigma_{max})^2 + (\sigma_{zp})^2}} \right], \quad (15)$$

где $R_{zp}(TCl)$ – предельно допустимое значение риска разрушения по условию заданной надежности конструкции дорожной одежды; TCl_{max}, TCl_{zp} – максимальное и предельное значения индекса технического состояния конструкции дорожной одежды; $\sigma_{max}, \sigma_{zp}$ – среднеквадратическое отклонение максимального и предельного значений индекса технического состояния конструкции.

Здесь максимальное значение индекса технического состояния конструкции дорожной одежды $TCl_{max} = 100$ соответствует требуемому значению индекса технического состояния конструкции на первый год эксплуатации автомобильной дороги, при котором риск разрушения $R(TCl) \xrightarrow{TCl} 0$.

Предельное значение индекса технического состояния конструкции дорожной одежды – значение, при котором вероятность отказа (разрушения) дорожной одежды соответствует риску разрушения $R_{zp}(TCl)$.

Применяя подход, изложенный в [24], и обозначив

$$B = 0,5 - R_{zp}(TCl) \text{ и } U = \frac{TCl_{max} - TCl_{zp}}{\sqrt{(\sigma_{max})^2 + (\sigma_{zp})^2}},$$

запишем уравнение (15) в следующем виде:

$$\Phi \left[\frac{TCl_{max} - TCl_{zp}}{\sqrt{(\sigma_{max})^2 + (\sigma_{zp})^2}} \right] = 0,5 - R_{zp}(TCl); \quad (16)$$

$$\Phi[U] = B. \quad (17)$$

Условие (17) выполняется, если

$$\frac{TCl_{max} - TCl_{zp}}{\sqrt{(\sigma_{max})^2 + (\sigma_{zp})^2}} = U. \quad (18)$$

В силу соблюдения условия $U = f(B)$ считаем величину U известной, что позволяет записать уравнение относительно TCl_{zp} в таком виде:

$$TCl_{zp} = TCl_{max} - U \cdot \left(\sqrt{(\sigma_{max})^2 + (\sigma_{zp})^2} \right). \quad (19)$$

Записав $\sigma_{zp} = CV_{zp} \cdot TCl_{zp}$, где CV_{zp} – коэффициент вариации параметра TCl_{zp} , и подставив в (19), получим квадратное уравнение:

$$\begin{aligned} TCl_{zp}^2 - 2 \cdot TCl_{zp} \cdot TCl_{max} + TCl_{max}^2 = \\ = U^2 \cdot (\sigma_{max})^2 + U^2 \cdot (CV_{zp} \cdot TCl_{zp})^2. \end{aligned} \quad (20)$$

Решив уравнение (20) относительно TCl_{zp} , получим

$$TCl_{zp} = \frac{\sqrt{TCl_{max}^2 + (U^2 \cdot CV_{zp}^2 - 1) \times} \times TCl_{max}}{U^2 \cdot CV_{zp}^2 - 1}, \quad (21)$$

$$\sigma_{max} = CV_{max} \cdot TCl_{max}, \quad (22)$$

где CV_{max} – коэффициент вариации максимального индекса технического состояния конструкции, определяемый согласно [23] для отличного качества строительства дорожной одежды.

Предположим, что коэффициенты запаса прочности по каждому из критериев (K_E, K_τ, K_σ), входящих в формулу (2) индекса технического состояния конструкции, являются независимыми величинами. Индекс технического состояния TCl не измеряют непосредственно, а определяют через входные величины K_E, K_τ, K_σ посредством функциональной зависимости, которую удобно представить в общем виде как $TCl = f(K_E, K_\tau, K_\sigma, X_1, X_2, \dots, X_N)$. Входные величины также можно рассматривать как величины, зависящие от других измеряемых параметров (X_1, X_2, \dots, X_N – толщины слоев, модуля упругости материала и т.д.).

Оценку измеряемой величины TCl , обозначаемую \overline{TCl} и имеющую смысл математического ожидания, получают из формулы (2), подставляя в нее входные оценки

$\overline{K_E}, \overline{K_\tau}, \overline{K_\sigma}, \overline{X_1}, \overline{X_2}, \dots, \overline{X_N}$ для величин $K_E, K_\tau, K_\sigma, X_1, X_2, \dots, X_N$. В этом случае выходная оценка \overline{TCI} , являющаяся результатом вычисления, определяется как среднее арифметическое m независимых определений величины TCI_i на участке автомобильной дороги по формуле [30]:

$$\begin{aligned} \overline{TCI} &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m TCI_i = \\ &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f(K_{Ei}, K_{\tau i}, K_{\sigma i}, X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{Ni}) \end{aligned} \quad (23)$$

При этом каждое независимое определение величины TCI_i основано на полном наборе наблюдаемых значений N входных величин $(K_E, K_\tau, K_\sigma, X_1, X_2, \dots, X_N)$, полученных в одно и то же время и характеризующихся одинаковой неоднородностью.

Тогда для расчета среднеквадратического отклонения индекса технического состояния конструкции ($\sigma(TCI)$) следует воспользоваться уравнением, основанном на аппроксимации функциональной зависимости $TCI = f(K_E, K_\tau, K_\sigma, X_1, X_2, \dots, X_N)$ ряда Тейлора первого порядка, которое может быть представлено в общем виде [30]:

$$\sigma^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot \sigma^2(x_i). \quad (24)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \sigma^2(TCI) &= \left(\frac{\partial TCI}{\partial K_E} \right)^2 \times \sigma^2(K_E) + \\ &+ \left(\frac{\partial TCI}{\partial K_\tau} \right)^2 \times \sigma^2(K_\tau) + \\ &+ \left(\frac{\partial TCI}{\partial K_\sigma} \right)^2 \times \sigma^2(K_\sigma) \end{aligned} \quad (25)$$

Приняв индекс технического состояния дорожной одежды $TCI_{\max} = 1$ (в долях единиц), что соответствует предельно допустимым значениям коэффициентов запаса прочности по критериям предельного состояния $(K_{E\max}, K_{\tau\max}, K_{\sigma\max})$ согласно [4], а также записав

$$\begin{aligned} \sigma(K_E) &= CV_E \cdot K_{E\max}, \\ \sigma(K_\tau) &= CV_\tau \cdot K_{\tau\max}, \quad \sigma(K_\sigma) = CV_\sigma \cdot K_{\sigma\max}, \end{aligned} \quad \text{урав-}$$

нение (26) после соответствующих преобразований представим в следующем виде:

$$\sigma_{\max}^2(TCI) = \frac{\alpha_E^2 \cdot CV_E^2 + \alpha_\tau^2 \cdot CV_\tau^2 + \alpha_\sigma^2 \cdot CV_\sigma^2}{(\alpha_E + \alpha_\tau + \alpha_\sigma)^2} \quad (26)$$

Подставив в левую часть уравнения (26) выражение (22) и приняв $TCI_{\max} = 1$, получим

$$CV_{\max} = \frac{\sqrt{\alpha_E^2 \cdot CV_E^2 + \alpha_\tau^2 \cdot CV_\tau^2 + \alpha_\sigma^2 \cdot CV_\sigma^2}}{\alpha_E + \alpha_\tau + \alpha_\sigma} \quad (27)$$

Коэффициенты вариации запаса прочности по допускаемому упругому прогибу (CV_E), сдвигу в грунтах земляного полотна (CV_τ) и сопротивлению растяжению при изгибе (CV_σ) получим после решения уравнения (23) относительно соответствующих коэффициентов запаса прочности:

$$\begin{aligned} K_E &= E_{заг} / E_{норм}; \quad K_\tau = T_{дон} / \tau_{акт}; \\ K_\sigma &= R_{зг} / \sigma, \end{aligned} \quad (28)$$

где K_E, K_τ, K_σ – коэффициенты запаса прочности по допускаемому упругому прогибу, сопротивлению сдвигу в грунтах земляного полотна и слоях из несвязанных материалов, сопротивлению растяжению при изгибе; $E_{заг}, E_{норм}$ – общий и требуемый модули упругости конструкции дорожной одежды, МПа; $T_{дон}, \tau_{акт}$ – допустимое и активное напряжение сдвига в грунтах земляного полотна и слоях из несвязанных материалов, МПа; $R_{зг}, \sigma$ – прочность монолитного материала на растяжение при изгибе и напряжение растяжения при изгибе, возникающее под действием транспортной нагрузки, МПа.

В результате проведенных преобразований получим

$$CV_E = \sqrt{C_{заг}^2 + C_{норм}^2}; \quad (29)$$

$$CV_\tau = \sqrt{C_{Тдон}^2 + C_\tau^2}; \quad (30)$$

$$CV_\sigma = \sqrt{C_{Rзг}^2 + C_\sigma^2}, \quad (31)$$

где $C_{заг}, C_{норм}$ – коэффициент вариации общего и требуемого модуля упругости кон-

струкции дорожной одежды; $C_{Тдоп}$, C_{τ} – коэффициент вариации допустимого и активного напряжения сдвига в грунтах земляного полотна и слоях из несвязанных материалов, возникающего от веса конструкции дорожной одежды и действия транспортной нагрузки; C_{R3z} , C_{σ} – коэффициент вариации прочности на растяжение при изгибе материала монолитного слоя и напряжения растяжения при изгибе, которые возникают под действием транспортной нагрузки.

Значения коэффициентов вариации прочности для отличного качества строительства дорожной одежды [24, 25] принимаем по данным [23].

Как показывают исследования [23], коэффициенты вариации прочности ($C_{заг}$, $C_{Тдоп}$, C_{R3z}) и напряжений ($C_{нотр}$, C_{τ} , C_{σ}) связаны с показателями неоднородности толщины конструктивных слоев дорожных одежд, прочностных и деформационных характеристик материалов слоев. Это открывает принципиальную возможность для установления связи между инструментально измеряемыми геометрическими, физико-механическими и электрофизическими параметрами конструктивных слоев дорожных одежд и показателями состояния дорожных одежд, в том числе индексом технического состояния и надежностью дорожной одежды.

Выводы

Таким образом, применение теоретико-вероятностного подхода позволяет оценить техническое состояние и надежность конструкции дорожной одежды, а также определить пределы изменения индекса технического состояния и соответствующие параметры однородности конструкции дорожной одежды. Изложенный подход позволяет:

- установить функциональную связь между индексом технического состояния конструкции и надежностью дорожной одежды;

- исследовать закономерности изменения надежности конструкции дорожной одежды в зависимости от коэффициентов вариации показателей ее технического состояния;

- оценить надежность дорожной одежды по результатам диагностики, привлекающей неразрушающие методы.

Литература

1. Paulo Pereira, Jorge Pais. Main flexible pavement and mix design methods in Europe and challenges for the development of an European method. *Journal of traffic and transportation engineering* (English edition), 2017. № 4 (4). P. 316–346.
2. Shell Pavement Design Manual. Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic. Shell Laboratory. Amsterdam. Holland, 1978. 38 p.
3. ТКП 45-3.03-112-2008. Автомобильные дороги. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования. Минск, 2009. 88 с.
4. ГБН В.2.3-37641918-559:2019. Автомобільні дороги. Дорожній одяг нежорсткий. Проектування. Київ, 2019. 63 с.
5. ВБН В.2.3-218-186-2004. Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу. Київ, 2005. 176 с.
6. Васильев А. П., Яковлев Ю. М., Коганзон М. С. Принципы прогнозирования транспортно-эксплуатационного состояния дорог. *Автомобильные дороги*. 1993. № 1. С 8–10.
7. Радовский Б. С. Сердюк А. В. Прогнозирование закономерностей изменения состояния дорожной одежды. *Автомобильные дороги*. 1994. № 7. С. 19–22.
8. Красиков О. А. Обоснование стратегий ремонта нежестких дорожных одежд: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.11 / Алматы, 1999. 597 с.
9. Золотарь И. А., Некрасов В. К., Коновалов С.В. Повышение надежности автомобильных дорог. Москва, 1977. 183 с.
10. Коганзон М. С., Яковлев Ю. М. Качество и надежность дорожного строительства: уч. пособ. Москва, 1981. 90 с.
11. Некоторые результаты применения теории надежности к оценке эксплуатационного состояния дорог в северных областях Казахской ССР / Могилевич В. М., Слободчиков Ю. В., Сиппле Е. В., Ситников Ю. М. *Повышение транспортно эксплуатационных показателей автомобильных дорог Казахской ССР*: сб. науч. трудов. Алма-Ата, 1971. С. 11–23.
12. Коновалов С. В., Радовский Б. С., Билан О. О. Применение метода статистических испытаний к оценке надежности и качества дорожных одежд. *Автомобильные дороги в дорожном строительстве*. 1977. Вып. 21. С. 63–67.
13. Нежесткие дороги. Отчет комитета С8 (XX Всемирный дорожный конгресс). Монреаль: PARC-AIPCR, 1995. 98 с.
14. Слободчиков Ю. В. Обоснование оценочных показателей выбора ремонтной стратегии автомобильных дорог с нежесткими дорожными одеждами в изменяющихся условиях эксплуатации: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.11 / МАДИ. Москва, 1995. 333 с.
15. Ababutain A. Y., Bullen A. Multicriteria. Decision-Making Model for Selection of Build-Operate-Transfer Toll Road Proposals in the Public Sector. *Transportation Research Record*. 2003. № 1848. P. 1–9.

16. Durango-Cohen P., Madanat S. Optimal maintenance and repair policies in infrastructure management under Uncertain Facility Deterioration Rates: an Adaptive Control Approach. *Transportation Research Record*. 2002. № 36 (9). P. 763–778.

17. Retherford J.Q. Management of Uncertainty for Flexible Pavement Design Utilizing Analytical and Probabilistic Methods (PhD thesis) / Vanderbilt University, Nashville. 2012. 289 p.

18. Sharma H., Swamy A. K. Development of probabilistic fatigue curve for asphalt concrete based on viscoelastic continuum damage mechanics. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2016. № 9 (4). P. 270–279.

19. Sun L., Hudson W. R. Probabilistic approaches for pavement fatigue cracking prediction based on cumulative damage using miner's law. *Journal of Engineering Mechanics*. 2005. 131 (5). P. 546–549.

20. Dinegdae Y. H., Birgisson B. Reliability-based calibration for a mechanics-based fatigue cracking design procedure. *Road Materials and Pavement Design*. 2016. 17 (3). P. 529–546.

21. Yue Huang, Fabio Galatioto, Tony Parry. Road pavement maintenance life cycle assessment – a case study. *International Symposium on Pavement LCA*. (October 14–16, 2014, Davis, California, USA), 2014. P.179–190.

22. Yared H Dinegdae, Björn Birgisson. Reliability-based design procedure for fatigue cracking in asphalt pavements. *Transportation Research Record*. SAGE Publications. 2016. P. 127–133.

23. Гамеляк І. П. Основи забезпечення надійності конструкцій дорожнього одягу: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.11 / КАДІ. Київ, 2005. 438 с.

24. Проектирование автомобильных дорог с учетом теории риска. В 2 ч. Ч. 1, 2. / В. В. Столяров. Саратов: СГТУ, 1994. 184 с., 232 с.

25. Кокодеєва Н. Е. Методологічні основи комплексної оцінки надійності автомобільних дорог в системі технічного регулювання дорожнього господарства : дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.11 / С-ПГУ. Санкт-Петербург, 2012. 322 с.

26. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. Москва: Стройиздат, 1978. 239 с.

27. Батракова А. Г. Методологія моніторингу дорожніх одягів нежорсткого типу із застосуванням георадіолокаційних технологій: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.11 / ХНАДУ. Харків, 2014. 390 с.

28. Батракова А. Г., Урдзик С. Н. Критерии оценки состояния дорожных одежд по результатам диагностики. *Вісник ХНАДУ: зб. наук. пр.* 2015. Вип. 68. С. 92–98.

29. Веренько В. А. Надежность дорожных одежд: пособие. Минск: БГПА, 2002. 120 с.

30. ГОСТ 34100.3–2017 / ISO / IEC Guide 98-3:2008, IDT. Неопределенность измерения

Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Москва, 2018. 64 с.

References

1. Paulo Pereira, Jorge Pais. Main flexible pavement and mix design methods in Europe and challenges for the development of an European method. *Journal of traffic and transportation engineering (English edition)*. 2017. No 4 (4). pp. 316–346.
2. Shell Pavement Design Manual. Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic. Shell Laboratory. Amsterdam. Holland, 1978. 38 p.
3. ТКР 45-3.03-112-2008. *Автомобільні дороги. Незагості дороги одежди. Правила проектування* [State Standard 45-3.03-112-2008. Highways. Non-rigid pavements. Design rules]. Minsk, 2009. 88 p.
4. GBN V.2.3-37641918-559:2019. *Автомобільні дороги. Дорожній одяг нежорсткого типу* [State Standard V.2.3-37641918-559:2019. Highways. Non-rigid pavements. Design]. Kyiv, 2019. 63 p.
5. VBN V.2.3-218-186-2004. *Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу* [State Standard V.2.3-218-186-2004. Constructions of transport. Non-rigid pavement]. Kyiv, 2005. 176 p.
6. Vasil'yev A. P., Yakovlev YU. M., Koganzon M. S. Printsipy prognozirovaniya transportno-ekspluatatsionnogo sostoyaniya dorog [Principles of forecasting of transport-operational condition of roads]. *Автомобільні дороги*. 1993. № 1. Pp. 8–10.
7. Radovskiy B. S. Serdyuk A. V. Prognozirovaniye zakonornostey izmeneniya sostoyaniya dorozhnoy odezhdy [Prediction of the variation of the pavement condition patterns]. *Автомобільні дороги*. 1994. № 7. Pp. 19–22.
8. Krasikov O. A. *Obosnovaniye strategiy re-monta nezhestkikh dorozhnykh odezhd*: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.23.11 [Justification for non-rigid pavement repair strategies. Doct. tech. sci. diss.]. Almaty, 1999. 597 p.
9. Zolotar I. A., Nekrasov V.K., Konovalov S.V. *Povysheniye nadezhnosti avtomobil'nykh dorog* [Improving the reliability of roads]. Moscow, Transport Publ., 1977. 183 p.
10. Koganzon M. S., Yakovlev YU. M. *Kachestvo i nadezhnost' dorozhnogo stroitel'stva: ucheb. Posobiye* [The quality and reliability of road construction]. Moscow, MADI Publ., 1981. 90 p.
11. Nekotoryye rezul'taty primeneniya teorii nadezhnosti k otsenke eks-pluatatsionnogo sostoyaniya dorog v severnykh oblastiakh Kazakhskoy SSR / Mogilevich V. M., Slobodchikov YU. V., Sipple Ye. V., Sitnikov YU. M. [Some results of applying reliability theory to assessing the operational condition of roads in the northern regions of the Kazakh SSR]. *Povysheniye transportno-ekspluatatsionnykh pokazateley avtomobil'nykh dorog Kazakhskoy*

- SSR: sb. nauch. trudov. Alma-Ata, 1971. Pp. 11–23.
12. Konovalov S. V., Radovskiy B. S., Bilan O. O. Primeneniye metoda statisticheskikh ispytaniy k otsenke nadezhnosti i kachestva dorozhnykh odezhd [The application of the method of statistical tests to assess the reliability and quality of pavement]. *Avtomobil'nyye dorogi v dorozhnom stroitel'stve*. 1977. Vyp. 21. pp. 63–67.
 13. *Nezhestkiye dorogi. Otchet komiteta S8 (XX Vsemirnyy dorozhnyy kongress)* [Non-rigid road. Report of Committee C8 (XX World Road Congress)]. Montreal, PARC-AIPCR, 1995. 98 p.
 14. Slobodchikov YU. V. *Obosnovaniye otsenochnykh pokazateley vybora remontnoy strategii avtomobil'nykh dorog s nezhestkimi dorozhnyimi odezhdami v izmenyayushchikhsya usloviyakh ekspluatatsii*: dis. ... d-ra tekhn. nauk : 05.23.11 [Justification of the estimated indicators for choosing a repair strategy for roads with non-rigid pavements in changing operating conditions. Doct. tech. sci. diss.]. Moscow, 1995. 333 p.
 15. Ababutain A. Y., Bullen A. Multicriteria. Decision-Making Model for Selection of Build-Operate-Transfer Toll Road Proposals in the Public Sector. *Transportation Research Record*. 2003. no 1848. Pp. 1–9.
 16. Durango-Cohen P., Madanat S. Optimal maintenance and repair policies in infrastructure management under Uncertain Facility Deterioration Rates: an Adaptive Control Approach. *Transportation Research Record*. 2002. no 36 (9). Pp. 763–778.
 17. Retherford J. Q. Management of Uncertainty for Flexible Pavement Design Utilizing Analytical and Probabilistic Methods (PhD thesis). Vanderbilt University, Nashville. 2012. 289 p.
 18. Sharma H., Swamy A. K. Development of probabilistic fatigue curve for asphalt concrete based on viscoelastic continuum damage mechanics. International. *Journal of Pavement Research and Technology*, 2016. No 9 (4). Pp. 270–279.
 19. Sun L., Hudson W. R. Probabilistic approaches for pavement fatigue cracking prediction based on cumulative damage using miner's law. *Journal of Engineering Mechanics*, 2005. 131 (5). Pp. 546–549.
 20. Dinegdae Y. H., Birgisson B. Reliability-based calibration for a mechanics-based fatigue cracking design procedure. *Road Materials and Pavement Design*, 2016. 17 (3). Pp. 529–546.
 21. Yue Huang, Fabio Galatioto, Tony Parry. Road pavement maintenance life cycle assessment – a case study. International Symposium on Pavement LCA. (October 14–16, 2014, Davis, California, USA), 2014. Pp. 179–190.
 22. Yared H Dinegdae, Björn Birgisson. Reliability-based design procedure for fatigue cracking in asphalt pavements. *Transportation Research Record*. SAGE Publications. 2016. Pp. 127–133.
 23. Gamelyak I. P. *Osnovy zabezpechennya nadiynosti konstruktsiy dorozhnoho odyahu* : dys. ... d-ra tekhn. nauk: 05.22.11 [Foundations for ensuring the reliability of pavement designs. Doct. tech. sci. diss.]. Kyiv, 2005. 438 p.
 24. *Proyektirovaniye avtomobil'nykh dorog s uchetom teorii riska*. V 2-kh ch. CH. 1, 2 / V. V. Stolarov. [Road design based on the theory of risk]. Saratov, SGTU Publ., 1994. CH. 1–184 p., CH. 2–232 p.
 25. Kokodeyeva N. Ye. *Metodologicheskiye osnovy kompleksnoy otsenki nadezhnosti avtomobil'nykh dorog v sisteme tekhnicheskogo regulirovaniya dorozhnogo khozyaystva*: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.23.11 [Methodological bases of a complex estimation of reliability of road maintenance in the road sector regulation system. Doct. tech. sci. diss.]. Sankt-Peterburg, 2012. 322 p.
 26. Rzhantsyn A. R. *Teoriya rascheta stroitel'nykh konstruktsiy na nadezhnost'* [The theory calculation of building designs for reliability]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978. 239 p.
 27. Batrakova A. G. *Metodolohiya monitorynhu dorozhnykh odyahiv nezhorstkoho typu iz zastosovanniam heoradiolokatsiynykh tekhnolohiy*: dys. ... d-ra tekhn. nauk: 05.22.11 [Methodology for non-rigid pavement monitoring using GPR technology. Doct. tech. sci. diss.]. Kharkiv, 2014. 390 p.
 28. Batrakova A. G., Urdzik S.N. Kriterii otsenki sostoyaniya dorozhnykh odezhd po rezul'tatam diagnostiki [Criteria for assessing the condition of pavement based on diagnostic results]. *Visnik KHNADU – Bulletin of KHNADU*. 2015. Vup. 68. Pp. 92–98.
 29. Veren'ko V. A. *Nadezhnost' dorozhnykh odezhd: posobiye* [Reliability of road pavement]. Minsk, BGPA Publ., 2002. 120 p.
 30. ГОСТ 34100.3–2017 / ISO / IEC Guide 98-3:2008, IDT. Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement. Moscow, 2018. 64 p.
- Батракова Анжелика Геннадьевна**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой проектирования дорог, геодезии и землеустройства, тел.+38(057)707-37-32, e-mail: rp@khadi.kharkov.ua
- Урдзик Сергей Николаевич**, ассистент кафедры проектирования дорог, геодезии и землеустройства, тел. +38(057)707-37-32, e-mail: rp@khadi.kharkov.ua
- Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, ул. Ярослава Мудрого, 25, Харьков, 61002.
- Statement of the problem of assessing non-rigid pavement condition**
- Abstract.** The complexity of assessing the state of pavement at the operation stage is associated with a significant heterogeneity of its geometric and physical and mechanical parameters. Therefore, the aim of the paper is to develop a model for assessing the state of pavement, based on the theoretical funda-

mentals of the reliability theory and risk theory. Reliability is a measure of the adequacy of the design and is considered in the paper as the probability of failure-free operation of the pavement according to an integral indicator – the index of the technical condition of the pavement design, which characterizes the compliance of the pavement design with strength criteria. Since most of the properties of materials and structures, stresses in structures obey the normal distribution law, it is accepted that the technical condition index of pavement also obeys the normal distribution law. The application of reliability theory and risk theory allowed us to assess the technical condition and reliability of the pavement design, to establish a relationship between the index of technical condition of pavement, the coefficient of variation of the index of technical condition and the coefficient of reliability. The mathematical support for solving the problem of determining the limit values of the pavement technical condition index and its coefficient of variation is considered. The stated approach allows one to: establish a relationship between the index of the technical condition of the design of non-rigid pavement and reliability; to study the patterns of changes in the reliability of pavement design depending on the coefficients of variation and the index of technical condition; to evaluate the reliability of pavement based on the results of diagnostics, involving, among other things, non-destructive methods.

Keywords: pavement design, condition assessment, reliability, technical condition index, coefficient of variation.

Batrakova Angelika G.,

Dr. Techn. Sci., Professor, Head of Department of Highway Design, Geodesy and Land Management
tel.+38(057)707-37-32

e-mail: rp@khadi.kharkov.ua

Urdzik Sergey N.,

Assistant of Department of Highway Design, Geodesy and Land Management
tel.+38(057)707-37-32

e-mail: rp@khadi.kharkov.ua

Kharkov National Automobile and Highway University, Yaroslava Mudrogo str. 25, Kharkiv, 61002, Ukraine.

Визначення завдання оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу

Анотація. Складність оцінювання стану дорожнього одягу на етапі експлуатації пов'язана зі

значною неоднорідністю його геометричних і фізико-механічних параметрів. Тому метою статті є розроблення моделі оцінювання стану дорожнього одягу, що ґрунтується на положеннях теорії надійності та теорії ризику. Надійність є мірою адекватності проекту і розглядається в роботі як імовірність безвідмовної роботи дорожнього одягу за інтегральним показником – індексом технічного стану конструкції дорожнього одягу, що характеризує відповідність конструкції дорожнього одягу критеріям міцності. Оскільки більшість властивостей матеріалів і конструкцій, напруження в конструкціях відповідають нормальному закону розподілу, індекс технічного стану дорожнього одягу також відповідає нормальному закону розподілу. Застосування теорії надійності та теорії ризику дозволило оцінити технічний стан і надійність конструкції дорожнього одягу, встановити зв'язок між індексом технічного стану дорожнього одягу, коефіцієнтом варіації індексу технічного стану та коефіцієнтом надійності. Розглянуто математичний апарат для вирішення завдання визначення граничних значень індексу технічного стану дорожнього одягу та коефіцієнта варіації індексу технічного стану. Викладений підхід дозволяє встановити зв'язок між індексом технічного стану конструкції нежорсткого дорожнього одягу та надійністю; дослідити закономірності змінювання надійності конструкції дорожнього одягу залежно від коефіцієнтів варіації та індексу технічного стану; оцінити надійність дорожнього одягу за результатами діагностики, яка залучає різноманітні методи, зокрема руйнівні.

Ключові слова: конструкція дорожнього одягу, оцінювання стану, надійність, індекс технічного стану, коефіцієнт варіації.

Батракова Анжеліка Геннадіївна,

д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою,
тел.+38(057)707-37-32,

e-mail: rp@khadi.kharkov.ua

Урдзік Сергій Миколайович,

асистент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою, тел.+38(057)707-37-32,

e-mail: rp@khadi.kharkov.ua

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Mudrogo, 25, Харків, 61002, Україна.