

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2018, №4, Том 5 / 2018, No 4, Vol 5 <https://t-s.today/issue-4-2018.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/01SATS418.pdf>

DOI: 10.15862/01SATS418 (<http://dx.doi.org/10.15862/01SATS418>)

Статья поступила в редакцию 20.07.2018; опубликована 08.09.2018

Ссылка для цитирования этой статьи:

Тиратурян А.Н. Механико-статистический метод оценки остаточного ресурса нежестких дорожных одежд // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №4, <https://t-s.today/PDF/01SATS418.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/01SATS418

For citation:

Tiraturyan A.N. (2018). Mechanical-statistical method of estimation of the residual life of flexible pavements. *Russian journal of transport engineering*, [online] 4(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/01SATS418.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/01SATS418

УДК 625.7/.8

ГРНТИ 73.31.11

Тиратурян Артем Николаевич

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: Tiraturjan@list.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=803524

Механико-статистический метод оценки остаточного ресурса нежестких дорожных одежд

Аннотация. Одной из важнейших задач дорожной отрасли на данный момент является разработка эффективных механизмов управления состоянием нежесткой дорожной одежды, учитывающих ее фактический остаточный ресурс. В работе изложены новые алгоритмы механико-статистического подхода к оценке остаточного ресурса нежестких дорожных одежд, сформулированные на основе комплекса теоретических и экспериментальных исследований. Предложено в качестве одного из основных показателей отклика дорожной конструкции на динамическое воздействие использовать плотность рассеиваемой энергии, рассчитываемую из площади динамической петли гистерезиса, под воздействием колеса расчетного автомобиля. В ходе натурных измерений установлены общие статистические закономерности распределения основных структурных параметров конструктивных элементов нежестких дорожных одежд (модулей упругости, коэффициентов демпфирования слоев). Выявлено, что статистическое распределение модулей упругости и коэффициентов демпфирования слоев нежестких дорожных одежд подчиняется логарифмически нормальному закону. Установлены закономерности изменения математического ожидания и дисперсии модулей упругости и коэффициентов демпфирования конструктивных слоев нежестких дорожных одежд. Разработана экспериментальная методика определения коэффициентов демпфирования конструктивных слоев нежестких дорожных одежд по результатам регистрации амплитудно-временной характеристики на поверхности покрытия дорожной одежды, с использованием установки FWD. На основе комплекса проведенных исследований разработаны алгоритмы механико-статистического метода оценки остаточного ресурса нежестких дорожных одежд и назначения слоев усиления на основе выполненного технического мониторинга, сочетающие в себе, алгоритмы численного моделирования для определения расчетных значений ресурса дорожной конструкции, а также результаты экспериментальных замеров, позволяющих на

любом этапе эксплуатации дорожной одежды, установить значения фактического остаточного ресурса, остаточного срока службы, гамма-процентного остаточного ресурса, гамма-процентного остаточного срока службы.

Ключевые слова: дорожная одежда; механико-статистический метод; технический мониторинг; остаточный ресурс; рассеиваемая энергия; петля гистерезиса; коэффициент демпфирования

Современная автомобильная дорога представляет собой сложную и комплексную систему, в которой особое место отводится дорожной одежде. Именно этот элемент призван воспринимать негативные природно-климатические факторы, а также воздействие транспортного потока, напряженность которого в условиях Российской Федерации постоянно возрастает.

Обеспечение долговечности дорожной одежды является очень важной и комплексной задачей, решение которой возможно только путем совершенствования методов проектирования и методов управления состоянием дорожной одежды. В терминах теории надежности долговечность – способность объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта и включает в себя:

- срок службы;
- гамма-процентный срок службы;
- остаточный ресурс;
- гамма-процентный ресурс.

Определение этих параметров возможно, как аналитическими, так и эмпирическим методами, однако наиболее рациональным видится использование аналитико-эмпирических процедур, включающих в себя как применение расчетных моделей, так и наличие эмпирических данных для нормировки этих моделей к реальным условиям функционирования объекта.

Вопросы моделирования напряженно-деформированного состояния и расчета нежестких дорожных одежд подробно рассматривались в работах Н.Н. Иванова, Б.С. Радовского, П.И. Теляева, А.Е. Мерзликина, М.В. Немчинова и др. [1-5]. Вопросы моделирования динамического напряженно-деформированного состояния дорожных одежд были раскрыты в работах А.В. Смирнова [6], разработавшего энергетический метод расчета дорожных одежд, С.К. Илиополова и Е.В. Угловой [7-8], разработавших комплекс математических моделей, позволяющих осуществлять анализ спектральных характеристик отклика нежестких дорожных одежд при динамическом нагружении.

В то же время при решении прикладных задач конструирования и расчета нежестких дорожных конструкций на первый план выходит определение основных компонент напряженно-деформированного состояния дорожных одежд в критических точках дорожной конструкции, к которым относится:

- поверхность покрытия дорожной одежды;
- нижняя граница пакета слоев асфальтобетона;
- поверхность основания;
- поверхность грунта земляного полотна.

При этом по данным разных источников, отмечается что в ряде отечественных работ, в качестве основных расчетных параметров, исследуемых в критических точках, принимаются растягивающие и сжимающие напряжения, а в зарубежных источниках и нормативных методах расчета растягивающие и сжимающие деформации соответственно. Также нельзя не отметить, что практически во всех применяемых на данный момент методах расчета для определения данных параметров служат модели статического НДС многослойного полупространства.

В целом же работа дорожной конструкции в процессе ее эксплуатации характеризуется сложным пространственным динамическим напряженно-деформированным состоянием, формирующимся под воздействием современного транспортного потока. Необходимо отметить, что в ее работе также чрезвычайно сильна вероятностная составляющая обусловленная неоднородностью структурных показателей дорожной одежды (толщины слоев, модулей упругости, коэффициентов демпфирования), а также целым рядом других факторов. На основе вышесказанного в качестве основного показателя, характеризующего напряженно-деформированное состояние дорожной конструкции в критических точках предлагается использовать плотность рассеиваемой энергии при движении расчетного транспортного средства, определяемую из площади петли динамического гистерезиса (рисунок 1), рассчитываемой с использованием модели динамического напряженно-деформированного состояния дорожной конструкции. В этом случае:

$$\iiint_{\Omega} \int_0^{\varepsilon} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} dS = E_{нов} + E_{P,S} + E^* ;$$

где левая часть приведенного выражения определяет энергию, закачиваемую в среду поверхностным источником по пятну контакта Ω ; $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$ – напряжения и деформации на поверхности дорожной конструкции; $E_{нов}$ – энергия, уносимая на бесконечность поверхностными волнами; $E_{P,S}$ – энергия объемных волн; E^* – величина энергии, рассеиваемой в структуре дорожной конструкции за счет проявления вязких свойств и внутренних аномалий.

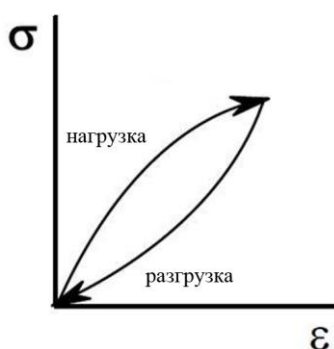


Рисунок 1. Петля упругого гистерезиса (составлено автором)

Таким образом применение плотности рассеиваемой энергии, является по сути интегральным показателем, учитывающим любые факторы взаимодействия колеса транспортного средства с покрытием дорожной одежды.

В рамках данного исследования была значительно усовершенствована модель динамического НДС дорожной конструкции с точки зрения эффективности и точности определения основных параметров НДС амплитудно-временных характеристик напряжений перемещений и деформаций в любой точке дорожной конструкции. Постановка задачи при этом выглядит следующим образом.

Область D представляет собой N -слойное упругое полупространство (рисунок 2):

$$D = D_1 \cup D_2 \cup \dots \cup D_N, \quad D_j = \{x, y \in (-\infty, \infty), z \in (z_{j-1}, z_j)\}, \quad z_j = \sum_{i=1}^j h_i; \quad (h_1 = 0) \quad - \text{ j-й слой (j=2, \dots, N) (рисунок 1).}$$

Упругие свойства сред в $D_j, j = 0, 1, \dots, N$ описываются плотностью ρ_j и коэффициентами Ламе λ_j, μ_j или соответственно модулем упругости E_j и коэффициентом Пуассона ν_j :

$$E_j = \mu_j \frac{3\lambda_j + 2\mu_j}{\lambda_j + \mu_j}, \quad \nu_j = \frac{\lambda_j}{2(\lambda_j + \mu_j)}.$$

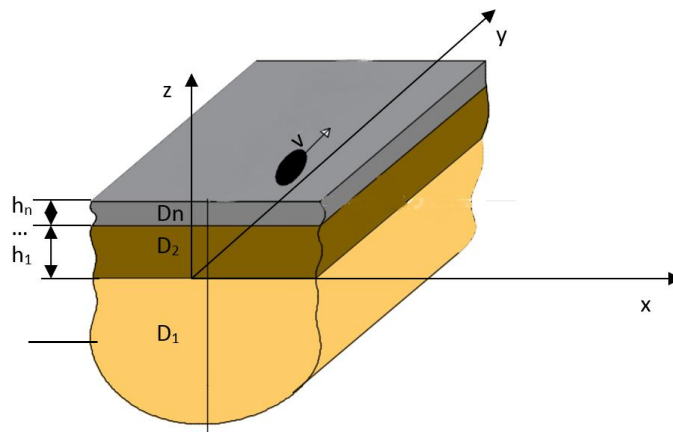


Рисунок 2. Многослойное полупространство «дорожная одежда – грунт» (составлено автором)

Движение среды определяется решением системы уравнений в частных производных:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}^{(j)}(\mathbf{r}, t) = \rho_j \frac{\partial^2 \mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

- $\boldsymbol{\sigma}^{(j)}(\mathbf{r}, t)$ – тензор напряжений Коши;
- $\mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}, t)$ – перемещения в точке наблюдения $\mathbf{r} = \{x, y, z\}$ в момент времени t , $\mathbf{u}^{(j)} = \{u_x^{(j)}, u_y^{(j)}, u_z^{(j)}\} = \{u_1^{(j)}, u_2^{(j)}, u_3^{(j)}\}$;
- индекс j соответствует номеру слоя (компоненты) слоистой конструкции (решение уравнений разыскивается отдельно для каждого j с последующим сопряжением решений вдоль границ раздела однородных сред).

Условия стыковки слоев между собой, а также полупространства с вышележащим слоем могут приниматься как жесткими, так и однородными условиями скользящего контакта, по одной или нескольким границам раздела.

Для решения задачи с подвижными возмущениями будем опираться на решение задачи об установившихся гармонических колебаниях с частотой ω в подвижной, связанной с нагрузкой системе координат. В предположении этого все соотношения для стационарной задачи далее выписаны в амплитудных функциях, в которых временной множитель $\exp(-i\omega t)$ опущен.

На границе области считаем заданными вектор-функции напряжений:

$$\mathbf{t}^{(N)} = \{\tau_{xz}^{(N)}, \tau_{yz}^{(N)}, \sigma_z^{(N)}\} = \mathbf{T}(\mathbf{R}), \quad z = z_N, \mathbf{R} = (x, y) \in \Omega \quad (2)$$

Система (2) с использованием закона Гука для линейно-упругого материала, связывающего компоненты тензора напряжений $\boldsymbol{\sigma}^{(j)}$ с компонентами тензора малых деформаций $\boldsymbol{\varepsilon}^{(j)}$:

$$\boldsymbol{\sigma}^{(j)} = 2\mu_j \boldsymbol{\varepsilon}^{(j)} + \lambda_j \mathbf{E} \operatorname{tr} \boldsymbol{\varepsilon}^{(j)}, \quad (3)$$

может быть сведена к эквивалентной системе уравнений Ламе относительно функций перемещений точек среды:

$$\nabla \nabla \cdot \mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}) - \frac{\theta_{j1}^2}{\theta_{j2}^2} \nabla \times \nabla \times \mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}) + \theta_{j1}^2 \mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}) = 0, \quad (4)$$

$\theta_{j1}^2 = \omega^2 a^2 / V_{Pj}^2$, $\theta_{j2}^2 = \omega^2 a^2 / V_{Sj}^2$ – приведенные частоты колебаний, $V_{Pj} = \sqrt{(\lambda_j + 2\mu_j) / \rho_j}$, $V_{Sj} = \sqrt{\mu_j / \rho_j}$ – скорости распространения продольных и поперечных волн в J -й среде.

Решение системы (4) строится с использованием интегрального преобразования Фурье по координатам x, y и применением принципа предельного поглощения [9-11]:

$$\mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{\Gamma_1 \Gamma_2} \mathbf{K}(\alpha, \beta, z, \omega) \cdot \mathbf{T}(\alpha, \beta) \exp[-i\alpha x - i\beta y] dx dy, \quad (5)$$

$\bar{\mathbf{T}}(\alpha, \beta)$ – преобразование Фурье от нагрузки $\mathbf{T}(\mathbf{R})$;

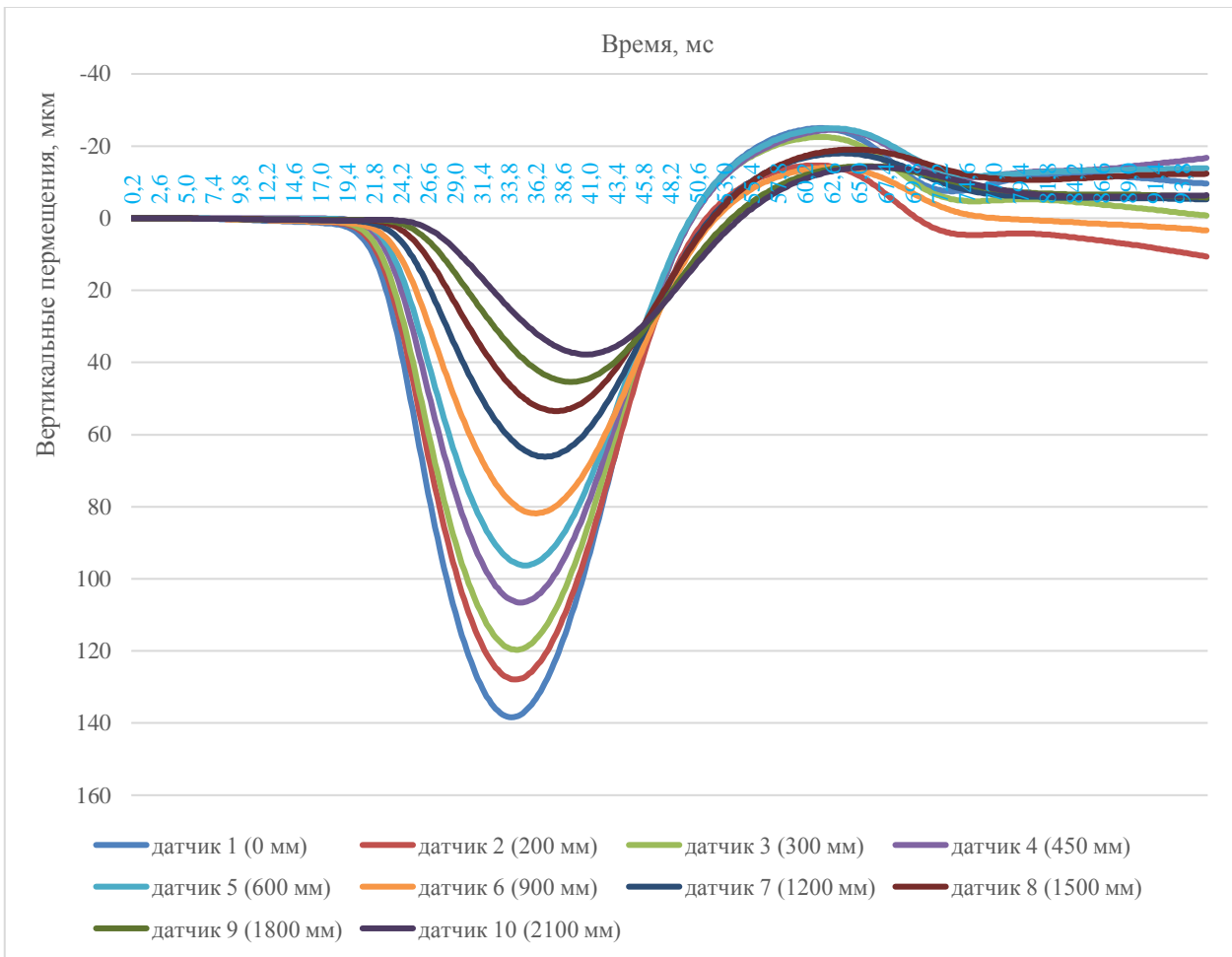
Γ_j – контур интегрирования, определяемый принципом предельного поглощения.

Введя подвижную систему координат $\tilde{y} = y - Vt$, воспользуемся принципом соответствия, по которому решение задачи с подвижным возмущением со скоростью V определяется численным интегрированием по (5) с заменой в подынтегральном выражении величины ω на $\omega^* = \omega + V\beta$.

При этом учитывая, что в реальных условиях при взаимодействии колеса транспортного средства с покрытием дорожной одежды в ее структуре формируется пространственное динамическое напряженно-деформированное состояние, плотность энергии целесообразно рассчитывать по формуле:

$$W = \int_0^\varepsilon \sigma_{xx} d\varepsilon_{xx} + \int_0^\varepsilon \sigma_{yy} d\varepsilon_{yy} + \int_0^\varepsilon \sigma_{zz} d\varepsilon_{zz} \quad (6)$$

На площадь петли гистерезиса влияют два основных параметра – модули упругости конструктивных слоев дорожной и коэффициент демпфирования слоя. Значения модулей упругости конструктивных слоев нежестких дорожных одежд определяются в ходе натурных измерений с использованием установки ударного нагружения FWD [12-14]. Коэффициенты демпфирования слоев дорожной конструкции определяются на основе анализа амплитудно-временной характеристики перемещений регистрируемой при ударном нагружении установки FWD (рисунок 3).



В скобках – расстояния установки датчика от точки ударного нагружения

Рисунок 3. Пример регистрации амплитудно-временной характеристики перемещений на поверхности дорожной одежды при ударном нагружении с использованием установки ударного нагружения FWD (составлено автором)

Значения коэффициентов демпфирования рассчитываются исходя из значений временного сдвига между экстремумами амплитудно-временной характеристики (АВХ) перемещений, зарегистрированной в натурных условиях. При этом в работе [14] установлено, что изменение коэффициента демпфирования слоев асфальтобетона связано с временным сдвигом между экстремумами АВХ перемещений в зоне 0-0.30 м от точки ударного нагружения, слоев основания 0.3-1.2 м, грунта земляного полотна 1.2-2.5 м.

Величина коэффициента демпфирования ζ может быть определена в соответствии с формулой:

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{2\pi^2 + \delta^2}},$$

$$\delta = \ln \frac{A_1}{A_2} \times \Delta t^{-1},$$

δ – логарифмический декремент затухания;

A_1 , A_2 – экстремумы амплитуд вертикальных перемещений, для которых рассчитывается коэффициент демпфирования;

Δt – сдвиг между амплитудно-временной характеристикой по датчикам.

Возможность определения данных параметров в натуральных условиях позволила сформулировать структурную схему механико-статистического метода оценки показателей долговечности нежестких дорожных конструкций, сочетающего в себе, алгоритмы численного моделирования для определения расчетных значений ресурса дорожной конструкции, а также результаты экспериментальных замеров, позволяющих на любом этапе эксплуатации дорожной одежды, установить значения фактического остаточного ресурса, остаточного срока службы, гамма-процентного остаточного ресурса, гамма-процентного остаточного срока службы (рисунки 4-6).

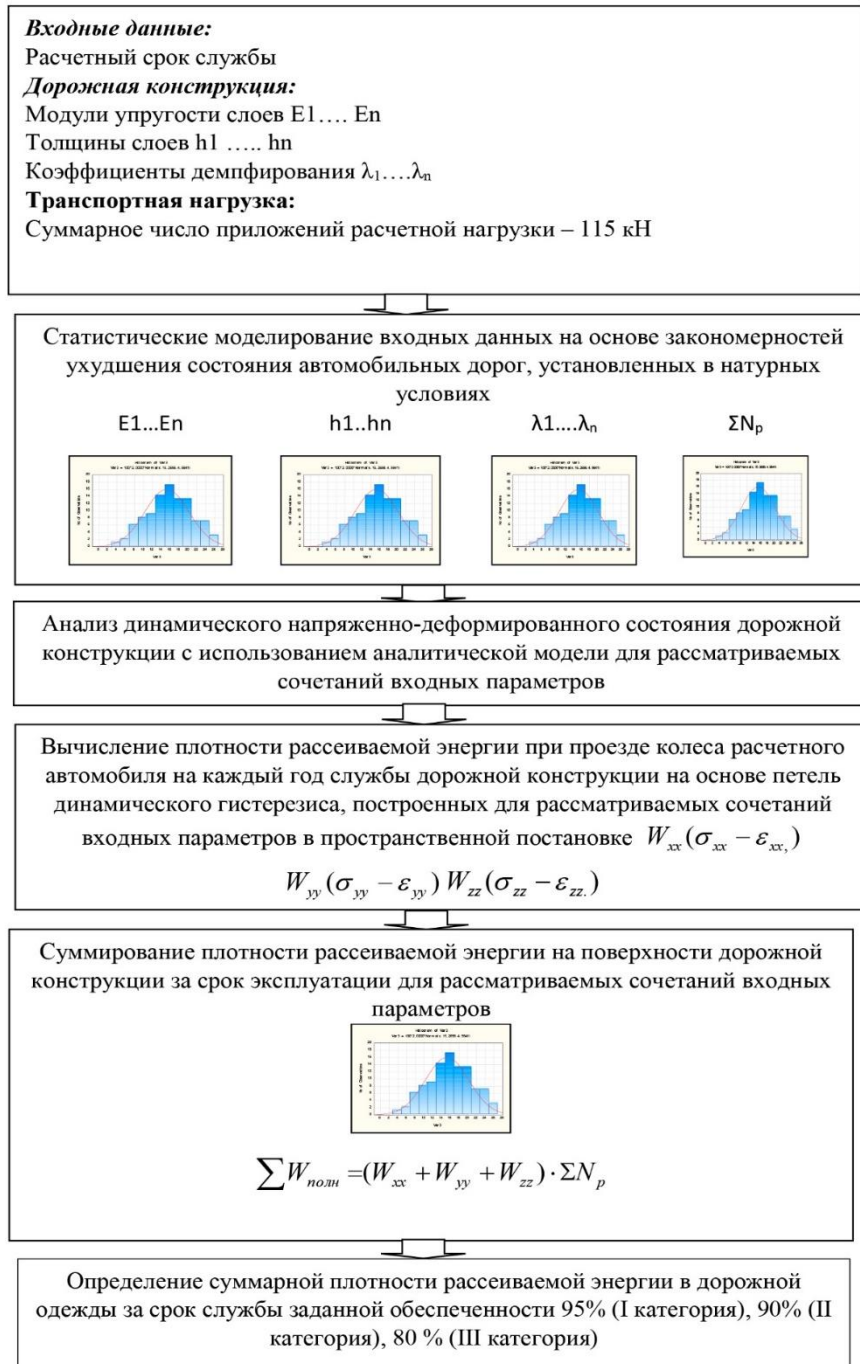


Рисунок 4. Алгоритм расчета суммарной плотности рассеиваемой энергии в структуре нежесткой дорожной одежды (составлено автором)

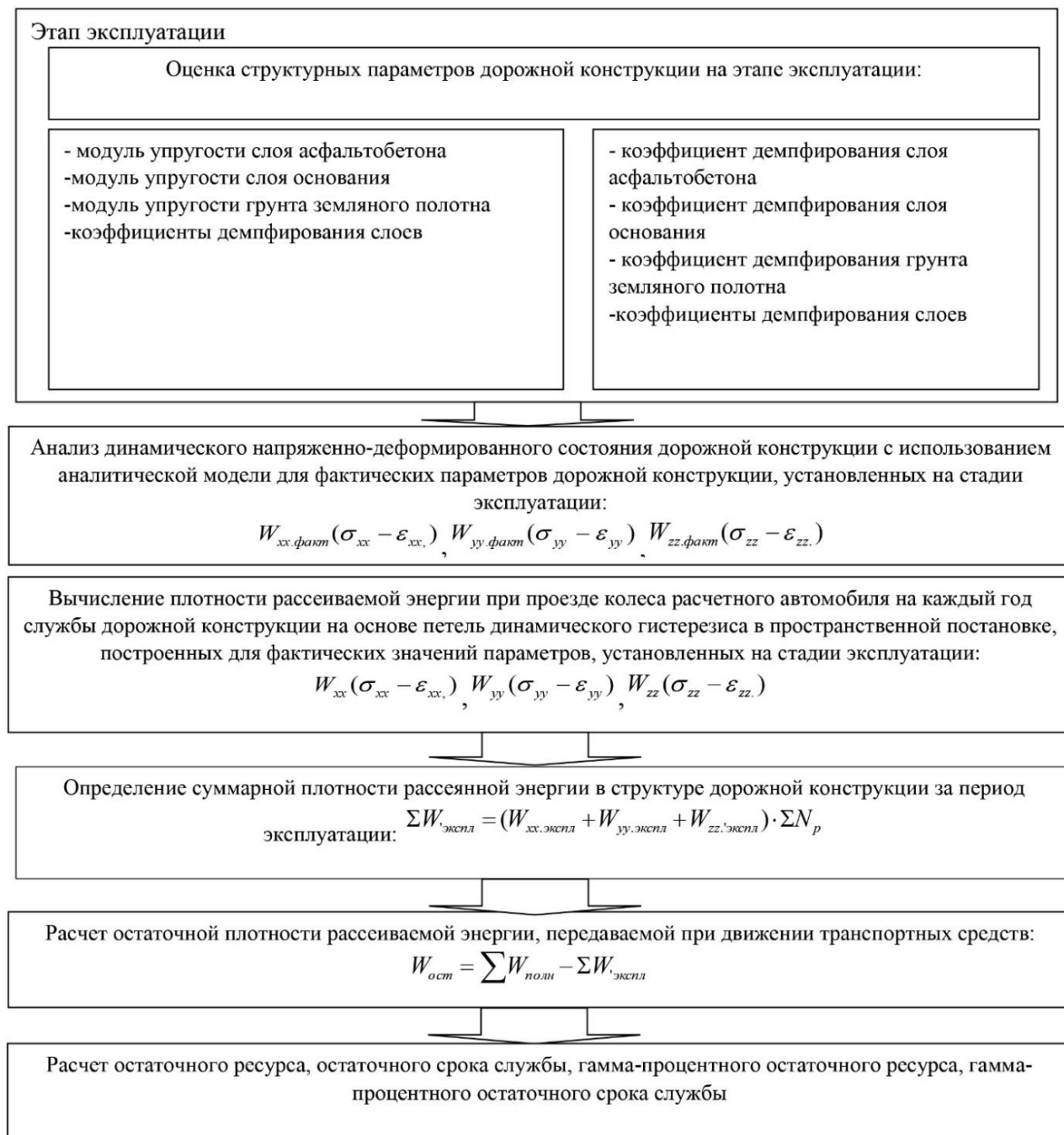


Рисунок 5. Алгоритм расчета остаточного ресурса нежесткой дорожной конструкции (составлено автором)

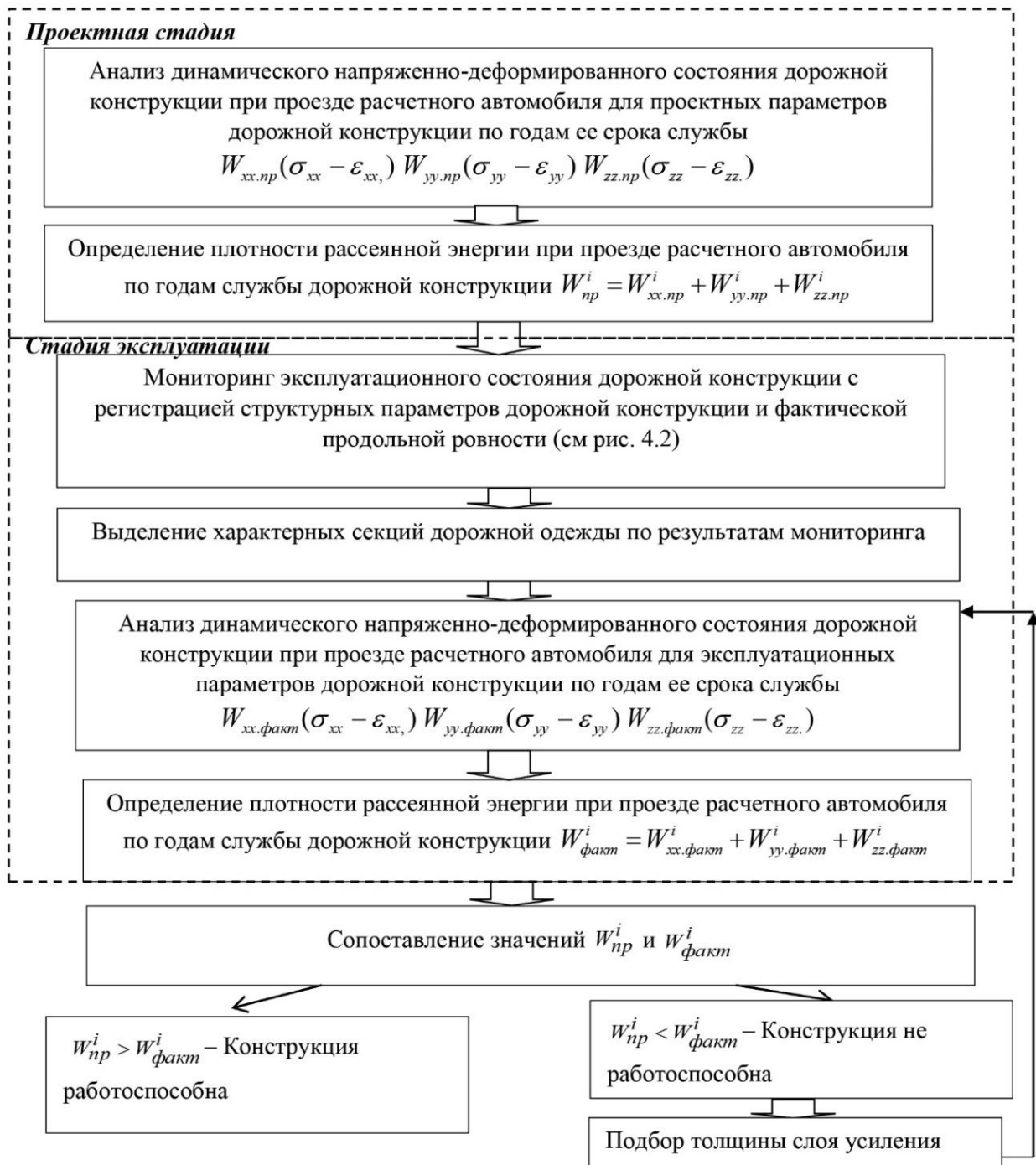


Рисунок 6. Методика обеспечения сохранности нежесткой дорожной одежды на основе механико-статистического метода (составлено автором)

Одним из ключевых моментов, определяющих эффективность разработанного метода является установление статистических параметров распределений основных структурных параметров (модули упругости, коэффициенты демпфирования, толщины слоев). Натурные исследования по исследованию данных параметров осуществлялись в период с 2015 по 2018 год, на участках федеральных автомобильных дорог общей протяженностью более 2000 км.

В ходе исследований было установлено, что распределения общих модулей упругости, модулей упругости конструктивных слоев, коэффициентов демпфирования в целом подчиняются логарифмически нормальному закону, при этом в процессе эксплуатации наблюдается снижение среднего значения, и увеличения дисперсии. Аналогичные результаты

касательно распределения общих модулей упругости были получены в работах проф. О.А. Красикова [15] Распределение толщин слоев дорожной одежды удовлетворительно описываются нормальным законом распределения.

Как известно плотность логарифмически нормального распределения описывается законом:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - m)^2}{2\sigma^2}},$$

где m и σ – параметры распределения, называемые параметрами масштаба (математическое ожидание) и формы распределения (стандартное отклонение).

Результаты натурных исследований представлены в таблицах 1-2.

Таблица 1

Средние значения параметров логнормального распределения модулей упругости конструктивных слоев дорожных конструкций для различных групп участков

Группы обследов. участков		Группа (со сроком службы менее 5 лет)	Группа (со сроком службы 5-10 лет)	Группа (со сроком службы более 10 лет)
Статистический параметр				
асфальтобетон	m	7.96	7.41	7.34
	σ	0.20	0.24	0.36
основание	m	5.65	5.24	5.10
	σ	0.20	0.25	0.37
грунт зем. полотна	m	4.30	4.10	4.02
	σ	0.15	0.20	0.23

Составлено автором

Таблица 2

Средние значения параметров логнормального распределения коэффициентов демпфирования дорожных конструкций для различных групп участков

Группы обследов. участков		Группа (со сроком службы менее 5 лет)	Группа (со сроком службы 5-10 лет)	Группа (со сроком службы более 10 лет)
Статистический параметр				
асфальтобетон	m	-2.79	-2.118	-1.63
	σ	0.29	0.34	0.40
основание	m	-3.54	-3.07	-2.72
	σ	0.31	0.32	0.36
грунт зем. полотна	m	-3.36	-3.33	-3.29
	σ	0.25	0.26	0.28

Составлено автором

Как видно из представленных таблиц в процессе эксплуатации дорожных конструкций наблюдается уменьшение математического ожидания модулей упругости и увеличение дисперсии их значений. Для коэффициентов демпфирования наблюдается обратная картина, так математическое ожидание данного параметра в течении срока службы увеличивается в связи с ухудшением состояния слоев дорожной одежды.

Апробация механико-статистического метода оценки долговечности нежесткой дорожной конструкции осуществлялась для существующей дорожной одежды, с расчетным сроком службы 12 лет. Конструкция дорожной одежды включает в себя пакет слоев асфальтобетона толщиной 20 см, слой основания – 64 см, грунт земляного полотна – суглинок тяжелый.

При расчете проектные значения толщин, модулей упругости и коэффициентов демпфирования слоев дорожной конструкции задавались в виде распределений данных параметров (пример для слоев асфальтобетона в течение расчетного периода представлен на рисунке 7), а их ухудшение в процессе эксплуатации моделировалось на основе полученных зависимостей изменения математического ожидания и дисперсии параметров в соответствии с графиками 5-8.

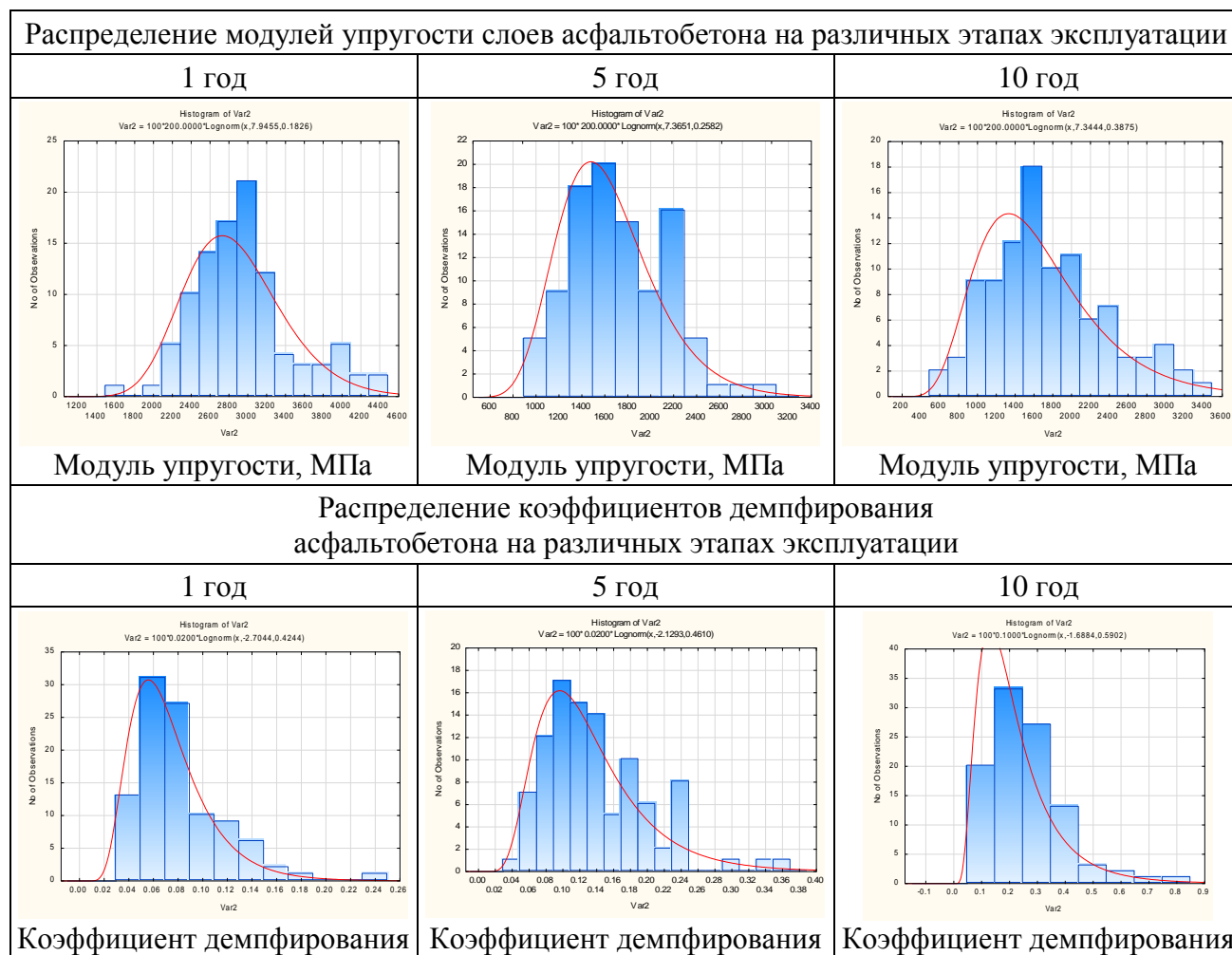


Рисунок 7. Распределение модулей упругости и коэффициентов демпфирования асфальтобетона (аналогично задаются параметры слоев основания и грунта земляного полотна) (составлено автором)

Для каждого года эксплуатации осуществлялся расчет 5 %, 95 % и среднего значения наработки (выражающегося в суммарной плотности рассеиваемой энергии в Дж/м³) дорожной одежды за расчетный срок службы (рисунок 8).

Суммарная плотность рассеиваемой энергии 95 % обеспеченности за весь срок службы дорожной одежды составит 2228 МДж/м³.

Для расчета остаточного ресурса дорожной конструкции на этапе эксплуатации использовались результаты мониторинга дорожной конструкции, проводимые на стадии ее приемки в 2012, и на 5-й год эксплуатации в 2017. По результатам натурных измерений в ходе мониторинга были установлены фактические значения модулей упругости и коэффициентов демпфирования слоев дорожной одежды с использованием установки ударного нагружения FWD (в дальнейшем в расчет принимались их значения 95%-й обеспеченности). На основе

полученных результатов по математической модели был осуществлен расчет суммарной плотности рассеиваемой энергии.

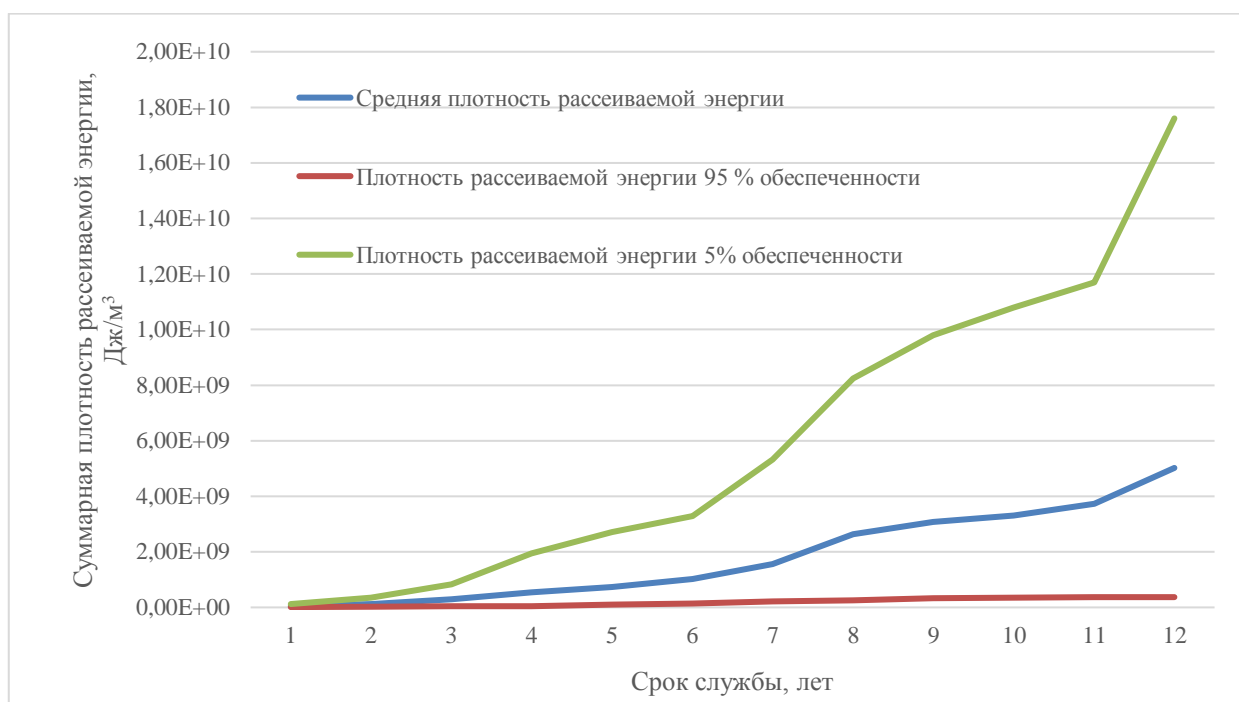


Рисунок 8. Расчет показателей 5 %, 95 % и среднего значения наработки дорожной одежды в течении ее срока службы (составлено автором)

1 год – 13 МДж (проект – 11.61 МДж)

5 год – 251 МДж (проект – 203.41 МДж)

Таким образом, отклонение проектного ресурса дорожной конструкции 95%-й обеспеченности от фактического составляет на 1-й год службы – 17 %, а на 5-й год службы – 24 %. В случае если тренд отклонения фактического ресурса от проектного останется прежним, то предельный объем суммарной рассеянной энергии в структуре дорожной конструкции составляющий 2087 МДж, будет достигнут уже на 10-й год ее срока службы вместо проектных – 12 лет.

Обеспечить требуемый срок службы при фактических условиях возможно путем своевременного устройства слоя усиления из щебеночно-мастичного асфальтобетона толщиной 2 см (расчет осуществлялся в соответствии с алгоритмом на рисунке б). Необходимо отметить, что устройство слоя такой толщины, может быть отнесено к выполнению работ по устройству слоев износа, т. е. к содержанию участка, и при минимальных текущих затратах позволит значительно снизить дисконтированные затраты, возникающие в процессе жизненного цикла дорожной одежды, обеспечив при этом расчетный срок службы дорожной конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд. Под ред. Н.Н. Иванова. М., Транспорт, 1973, 328 с.
2. Радовский Б.С. Проблемы механики дорожно-строительных материалов и дорожных одежд. К.: ООО «ПолиграфКонсалтинг», 2003 – 240 с.

3. Мерзликин А.Е., Приварников А.К. (1988) Об использовании адаптивных программ интегрирования при решении прикладных задач теории многослойных оснований. – В кн.: Новое в проектировании конструкций дорожных одежд. Труды Союздорнии. М., с. 22-36.
4. Теляев П.И., Смирнов Ю.И. (1979) Обоснование значений динамического коэффициента к нагрузке применительно к расчету дорожных одежд. – В кн.: Труды Союздорнии, Совершенствование конструкций и методов проектирования дорожных одежд, М., с. 19-27.
5. Немчинов М.В. Физика и динамика работы дорожной одежды автомобильных дорог. М.: Техполиграфцентр, – 102 с.
6. Смирнов, А.В. Динамическая устойчивость и расчет дорожных конструкций / А.В. Смирнов, С.К. Илиополов, А.С. Александров – Омск: СибАДИ, 2003. – 187 с.
7. Илиополов С.К., Углова Е.В., Селезнев М.Г. Динамика дорожных конструкций. Ростов-на/Д., РГСУ, 2002 – 260 с.
8. Углова Е.В., Илиополов С.К., Селезнев М.Г. Усталостная долговечность эксплуатируемых асфальтобетонных покрытий. Ростов-н/Д: РГСУ, 2009. – 244 с.
9. Ворович, И.И. Вибрация штампа на двуслойном основании / И.И. Ворович, М.Г. Селезнев, В.А. Бабешко // ПММ. – 1977. – Т. 41. – Вып.1. – С. 166-173.
10. Белоконь, А.В. К теории динамических задач с подвижными возмущениями для неоднородной упругой полосы / А.В. Белоконь // Докл. АН СССР. – 1981. – Т. 261. – № 5. – С. 1079-1082.
11. Белоконь А.В. Колебания упругой неоднородной полосы, вызванные движущимися нагрузками // Прикл. математика и механика. 1982 Т. 46. №2. С. 296-302.
12. Тиратурян, А.Н. Обратная задача об определении значений модулей упругости слоев эксплуатируемых дорожных конструкций / В.В. Мизонов, А.А. Ляпин, Е.В. Углова, С.К. Илиополов, А.Н. Тиратурян // Строительство и реконструкция. – 2011 – № 2 (34) – с. 88-93.
13. Тиратурян, А.Н. Использование метода "обратного" расчета при эксплуатации автомобильных дорог / В.В. Мизонов, А.Н. Тиратурян // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2011. – с. 25-27.
14. Tiraturyan A.N., Uglova E.V. Calculation of the Damping Factors of the Flexible Pavement Structure Courses According to the In-place Testing Data. Volume 187, 2017, Pages 742-748 Transportation Science and Technology: Proceedings of the 10th International Scientific Conference, TRANSBALTICA 2017; Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius; Lithuania; 4 May 2017 до 5 May 2017; Код 128230.
15. Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Lyapin A.A. Studying the energy distribution of the dynamic influences of road transport on the layers of nonrigid pavements. PNRPU Mechanics Bulletin Issue 2, 2017, Pages 178-194.
16. Красиков О.А. Закономерность расширяющейся дисперсии модуля упругости нежесткой дорожной одежды и ее практическая значимость. Дороги и мосты. №34. С. 185-199. 2016.

Tiraturyan Artem Nicolaevich

Don state technical university, Rostov-on-Don, Russia
E-mail: Tiraturjan@list.ru

Mechanical-statistical method of estimation of the residual life of flexible pavements

Abstract. One of the most important tasks of the road industry at the moment is the development of effective mechanisms for managing the state of flexible pavement, taking into account its actual residual resource. The paper presents new algorithms of the mechanic-statistical approach to the estimation of the residual resource of flexible pavements, formulated on the basis of a complex of theoretical and experimental studies. One of the main indicators of the response of a road structure to a dynamic effect is to use the density of the energy dissipated, calculated from the area of the dynamic hysteresis loop, under the influence of the calculating car wheel. In the course of full-scale measurements, general statistical regularities in the distribution of the basic structural parameters of structural elements of flexible pavements (elastic moduli, coefficients of layer damping) are established. It was revealed that the statistical distribution of elastic moduli and coefficients of damping of layers of flexible pavements obeys a logarithmically normal law. The regularities of the change in the mathematical expectation and dispersion of the elastic moduli and coefficients of damping of constructive layers of flexible pavements are established. An experimental technique for determining the coefficients of damping of constructive layers of flexible pavements has been developed based on the results of recording the amplitude-time characteristic on the surface of a pavement covering using the FWD. On the basis of a set of studies, algorithms for the mechanic-statistical method for estimating the residual life of flexible pavements and the designation of reinforcement layers based on technical monitoring have been developed, combining numerical simulation algorithms to determine the design values of the road construction resource, as well as experimental measurements permitting any stage of operation of pavement, set the values of the actual residual life, the remaining service life, gamma-percentage of residual life, gamma percentage residual life.

Keywords: pavements; mechanical-statistical method; technical monitoring; residual resource; energy dissipated; hysteresis loop; damping ratio

REFERENCES

1. (1973). *Konstruirovaniye i raschet nezhestkikh dorozhnykh odezhd*. Ed. by N.N. Ivanova. [*Designing and calculation of non-rigid road clothes.*] Moscow: Transportation, p. 328.
2. Radovskii B.S. (2003). *Problemy mekhaniki dorozhno-stroitelnykh materialov i dorozhnykh odezhd*. [*Problems of mechanics of road construction materials and road clothes.*] Kazan: PolygraphConsulting LLC, p. 240.
3. Merzlikin A.E., Privarnikov A.K. (1988). *Ob ispolzovanii adaptivnykh programm integrirovaniia pri reshenii prikladnykh zadach teorii mnogoslainnykh osnovanii*. V knige: *Novoe v proektirovanii konstruktsii dorozhnykh odezhd*. [*On the use of adaptive integration programs in solving applied problems in the theory of multilayered bases. In the book: New in designing of designs of road clothes.*] Moscow: Works of the Union, pp. 22-36.

4. Teliayev P.I., Smirnov Iu.I. (1979). Obosnovanie znachenii dinamicheskogo koeffitsienta k nagruzke primenitelno k raschetu dorozhnykh odezhd. V knige: Sovershenstvovanie konstruksii i metodov proektirovaniia dorozhnykh odezhd. [Substantiation of values of the dynamic coefficient to the load with reference to the calculation of road clothes. In the book: Perfection of designs and methods of designing of road clothes.] Moscow: Works of the Union, pp. 19-27.
5. Nemchinov M.V. (n.d.). Fizika i dinamika raboty dorozhnoi odezhdy avtomobilnykh dorog. [Physics and dynamics of the road pavement of highways.] Moscow: Technopolgraph, p. 102.
6. Smirnov A.V., Iliopolov S.K., Aleksandrov A.S. (2003). Dinamicheskaiia ustoichivost i raschet dorozhnykh konstruksii. [Dynamic stability and calculation of road structures.] Omsk: SibADI, p. 187.
7. Iliopolov S.K., Uglova E.V., Seleznev M.G. (2002). Dinamika dorozhnykh konstruksii. [Dynamics of road structures.] Rostov-on-Don: Rostov State Building University, p. 260.
8. Uglova E.V., Iliopolov S.K., Seleznev M.G. (2009). Ustalostnaia dolgovechnost ekspluatiruemykh asfaltobetonnykh pokrytii. [Fatigue life of exploited asphalt-concrete coatings.] Rostov-on-Don: Rostov State Building University, p. 244.
9. Vorovich I.I., Seleznev M.G., Babeshko V.A. (1977). Vibration of a stamp on a two-layered substrate. *PMM*, 1(41), pp. 166-173. (in Russian).
10. Belokon A.V. (1981). To the theory of dynamic problems with mobile perturbations for a non-homogeneous elastic strip. *Dokl. The USSR AS*, 5(261), pp. 1079-1082. (in Russian).
11. Belokon A.V. (1982). Oscillations of an elastic inhomogeneous band caused by moving loads. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2(46), pp. 296-302. (in Russian).
12. Mizonov V.V., Liapin A.A., Uglova E.V., Iliopolov S.K., Tiraturian A.N. (2011). An Inverse Problem of Determining the Modulus of Elastic Moduli of Layers of Operated Road Constructions. *Construction and Reconstruction*, 2(34), pp. 88-93. (in Russian).
13. Mizonov V.V., Tiraturian A.N. (2011). Using the method of "reverse" calculation in the operation of highways. *Science and technology in the road industry*, pp. 25-27. (in Russian).
14. Tiraturyan A.N., Uglova E.V. (2017). Calculation of the Damping Factors of the Flexible Pavement Structure Courses According to the In-place Testing Data. *Transportation Science and Technology*, 187, pp. 742-748.
15. Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Lyapin A.A. (2017). Studying the energy distribution of the dynamic influences of road transport on the layers of nonrigid pavements. *PNRPU Mechanics Bulletin Issue*, 2, pp. 178-194.
16. Krasikov O.A. (2016). The regularity of the expanding dispersion of the modulus of elasticity of non-rigid pavement and its practical significance. *Roads and bridges*, 34, pp. 185-199.