

Тиратурян А.Н., Углова Е.В., Ляпин А.А. Исследование распределения энергии динамического воздействия транспортных средств в слоях нежесткой дорожной конструкции // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 2. – С. 178–194. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.2.10

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*, 2017, no. 2, pp. 178-194. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.2.10



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 2, 2017

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI 10.15593/perm.mech/2017.2.10

УДК 531.3:625.7/8

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В СЛОЯХ НЕЖЕСТКОЙ ДОРОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ

А.Н. Тиратурян, Е.В. Углова, А.А. Ляпин

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 23 февраля 2017 г.
Принята: 05 июня 2017 г.
Опубликована: 30 июня 2017 г.

Ключевые слова:

дорожная конструкция, динамический гистерезис, модуль упругости, декремент затухания, диссипация энергии, расчетная нагрузка, энергетический подход, многослойное полупространство, аналитическая модель, подвижная система координат.

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены вопросы изучения распределения рассеиваемой (диссипируемой) механической энергии, передаваемой на покрытие дорожной одежды при движении по ней автомобильного транспорта. Для численного моделирования процесса передачи энергии была усовершенствована аналитическая модель динамического напряженно-деформированного состояния многослойного полупространства путем введения подвижной системы координат. Изучение распределения энергии осуществлялось для трех разнопрочных дорожных конструкций, для каждой из которых были получены амплитудно-временные характеристики напряжений и деформаций на поверхности слоев покрытия, основания и грунта земляного полотна, на основе которых были построены динамические петли гистерезиса. Был осуществлен анализ площадей динамических петель гистерезиса на поверхности слоев покрытия, основания и грунта земляного полотна, что позволило выявить качественные и количественные зависимости распределения плотности рассеиваемой энергии в слоях дорожной одежды. Установлено, что с увеличением капитальности дорожной конструкции уменьшается плотность энергии, рассеиваемой на ее поверхности, при этом темпы затухания энергии волновых полей в дорожной конструкции, генерируемой воздействием расчетной нагрузки, в значительной степени отличаются в зависимости от капитальности дорожной одежды и от различных типов конструктивных слоев, из которых она состоит. Наибольшее различие при этом определяется свойствами материала, применяемого в качестве слоя основания (укрепленное, неукрепленное). На основе проведенных исследований предложен новый подход к оценке проектного ресурса нежестких дорожных конструкций с позиций энергии, передаваемой на ее поверхность в течение всего срока службы.

© ПНИПУ

© Тиратурян Артем Николаевич – кандидат технических наук, старший преподаватель, e-mail: Tiraturjan@list.ru

Углова Евгения Владимировна – доктор технических наук, профессор, e-mail: Uglova.ev@yandex.ru

Ляпин Александр Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: lyapin.md@yandex.ru

Artem N. Tiraturyan – CSc in Technical Sciences, Senior Lecturer, e-mail: Tiraturjan@list.ru

Evgenia V. Uglova – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: Uglova.ev@yandex.ru

Alexander A. Lyapin – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: lyapin.md@yandex.ru



STUDYING THE ENERGY DISTRIBUTION OF THE DYNAMIC INFLUENCES OF ROAD TRANSPORT ON THE LAYERS OF NONRIGID PAVEMENTS

A.N. Tiraturyan, E.V. Uglova, A.A. Lyapin

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 23 February 2017
Accepted: 05 June 2017
Published: 30 June 2017

Keywords:

pavement, dynamic hysteresis, modulus of elasticity, damping constant, dissipation of energy, design load, energy approach, multilayer half-space, analytical model, moving coordinate system.

ABSTRACT

The paper deals with studying the distribution of the scattered (dissipating) mechanical energy transferred to the pavement cover when it is used by road transport. For the numerical simulation of the energy transfer process we improved the analytical model of the dynamic stress-strain state of the multilayered half-space by introducing the moving coordinate system. The energy distribution was studied for three road structures with different strengths. For each structure we obtained the amplitude-time characteristics of stress and strain on the surface of the coating layers, on the base and subgrade soil which have been used to build the dynamic hysteresis loops. We analyzed the areas of the dynamic hysteresis loops on the surface of the coating layers as well as the base and subgrade soil, which made it possible to reveal the qualitative and quantitative dependences of the density distribution of energy dissipation in the pavement layers. It is found that when the solidity of the road structure increases, the energy density which is dissipated on its surface decreases. The rate of the energy attenuation of wave fields in road structures which has been generated by the impact of the design load vary significantly depending both on the solidity of the pavement and various types of its structural layers. In this case the greatest difference is determined by the material properties which are used as the base layer (reinforced, unreinforced). Based on the studies, a new approach of evaluating the design service life of nonrigid road structures in terms of the energy transferred on its surface during its entire service life has been proposed.

© PNRPU

Современные автомобильные дороги представляют собой сложную систему, призванную обеспечить быстрое, комфортное и безопасное передвижение пользователя. Важнейшей частью этой системы является дорожная конструкция, непосредственно воспринимающая на себя нагрузки от транспортного потока и природно-климатических факторов. Основной задачей инженера-дорожника является обеспечение ее прочности и работоспособности, которые закладываются еще на стадии проектирования.

В практике Российской Федерации нормативным документом ОДН 218.046-01 регламентируется трехкритериальный расчет нежестких дорожных одежд, включающий:

- расчет конструкции в целом по допускаемому упругому прогибу;
- расчет по условию сдвигоустойчивости подстилающего грунта и малосвязных конструктивных слоев основания;
- расчет конструкции на сопротивление монолитных слоев усталостному разрушению от растяжения при изгибе.

Однако следует отметить, что основы используемого метода были разработаны в 50–60-е гг. XX в. и базируются на приведении многослойных систем, которые и представляют собой дорожные конструкции, к системам, представляющим собой слой, лежащий на однородном полупространстве. В то же время современное развитие методов механико-математического моделирования позволяет решать задачи, касающиеся исследования напряженно-деформированного состояния многослойных сред без каких-либо упрощений.

Фундаментальные основы для решения данного класса задач были заложены в работах ученых И.И. Воровича, В.А. Бабешко, А.В. Белокопя, Е.В. Глушкова и др. [1–13]. Эффективный математический аппарат для решения прикладных задач анализа напряженно-деформированного состояния нежестких дорожных одежд был создан в работах

С.К. Илиополова, М.Г Селезнева, Е.В. Угловой, А.А. Ляпина [14–27] и др. Использование в качестве базиса для проведения расчетных исследований, разработанных авторами математических моделей, позволяет решать широкий круг задач, в частности, касающихся исследования энергетических характеристик в дорожных конструкциях при воздействии движущегося транспорта.

Один из подходов к решению описанных выше задач был предложен в работах профессора А.В. Смирнова [28–30], посвященных разработке энергетического метода расчета нежестких дорожных одежд. Основным критерием разработанного им метода является условие

$$K_{п.у} = \frac{\sum_{\phi_i}^K \Pi_{\phi_i}}{A_p} \geq K_{п.у}^{\min}, \quad (1)$$

где Π_{ϕ_i} – суммарная потенциальная энергия разрушения слоев дорожной конструкции; $K_{п.у}$ – проектное значение обобщенного критерия работоспособности; A_p – работа сил веса движущегося транспорта; $K_{п.у}^{\min}$ – минимальное значение обособленного критерия работоспособности (составляет 1,2, 0,65, 0,45, 0,25 для различных уровней транспортно-эксплуатационного состояния).

Выгодным отличием предлагаемых в рамках разработанного подхода решений являлся учет динамических упругих прогибов, формирующихся под действием движущейся нагрузки, и динамических модулей упругости материалов слоев нежесткой дорожной одежды, зависящих от температуры и времени приложения нагрузки. В то же время применение современных механико-математических моделей динамического НДС многослойного полупространства позволяет значительно развить энергетический метод с точки зрения анализа рассеивания энергии движущегося транспортного средства в структуре дорожной одежды.

В общем виде энергетический баланс в дорожной конструкции при воздействии нагрузки, движущейся по поверхности с постоянной скоростью, может быть представлен в виде зависимости

$$\iint_{\Omega} \int_0^{\varepsilon} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} dS = E_{пов} + E_{p,s} + E^*,$$

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; $E_{пов}$ – 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.

При моделировании слоистой среды для рассматриваемых сочетаний физических и геометрических параметров слоев показано, что $E_{пов} = 0$, а также приняты следующие гипотезы:

- все слои дорожной конструкции характеризуются вязкоупругими свойствами;
- все слои являются изотропными;
- слои не ограничены по ширине;

– грунтово-геологический массив моделируется в виде упругого полупространства.

Для изучения внутреннего распределения энергии в структуре дорожной конструкции при движении транспорта с постоянной скоростью V была разработана аналитическая модель динамического напряженно-деформированного состояния многослойного полупространства, базирующаяся на положениях теории упругости и вязкоупругости. Постановка задачи записывается следующим образом.

Пусть область D представляет собой N -слойное упругое полупространство:

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

слой ($j=2, \dots, N$) (рис. 1).

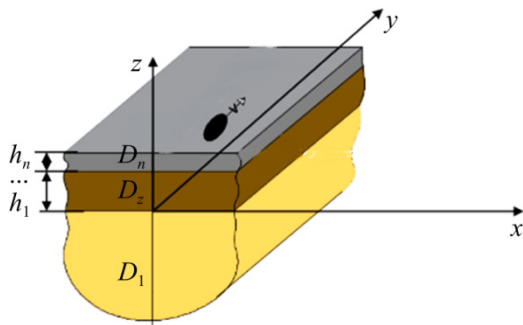


Рис. 1. Многослойное полупространство «дорожная конструкция – грунт»

Fig. 1. Multilayer half-space "pavement – soil"

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 :

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

В дальнейшем все параметры, имеющие размерность длины, будут отнесены к характерному линейному размеру a области распределения нагрузки Ω без изменения в их обозначениях.

Движение среды определяется решением системы уравнений в частных производных:

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

где $\boldsymbol{\sigma}^{(j)}(\mathbf{r}, t)$ – 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 (поиск решения уравнений осуществляется 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 векторы-функции напряжений:

$$\mathbf{t}^{(N)} = \{\tau_{xz}^{(N)}, \tau_{yz}^{(N)}, \sigma_z^{(N)}\} = \mathbf{T}(\mathbf{R}), \quad z = z_N, \quad \mathbf{R} = (x, y) \in \Omega. \quad (3)$$

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

$$\sigma^{(j)} = 2\mu_j \varepsilon^{(j)} + \lambda_j \mathbf{E} \operatorname{tr} \varepsilon^{(j)}, \quad (4)$$

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

$$\nabla \nabla \cdot \mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}) - \frac{\theta_{j1}^2}{\theta_{j2}^2} \nabla \times \nabla \times \mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}) + \theta_{j1}^2 \mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}) = 0, \quad (5)$$

где $\theta_{j1}^2 = \omega^2 a^2 / V_{pj}^2$, $\theta_{j2}^2 = \omega^2 a^2 / V_{sj}^2$, – 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 (5) строится с использованием интегрального преобразования Фурье по координатам x, y и применением принципа предельного поглощения [1, 3]:

$$\mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{\Gamma_1 \Gamma_2} \mathbf{K}(\alpha, \beta, z, \omega) \cdot \bar{\mathbf{T}}(\alpha, \beta) \exp[-i\alpha x - i\beta y] dx dy, \quad (6)$$

где $\bar{\mathbf{T}}(\alpha, \beta)$ – 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 [2, 3], по которому решение задачи с подвижным возмущением со скоростью V определяется численным интегрированием по (6) с заменой в подынтегральном выражении величины ω на $\omega^* = \omega + V\beta$.

При наличии диссипации в среде, определяющейся вязкоупругими свойствами материала, воспользуемся принципом упругого – вязкоупругого соответствия, по которому коэффициенты Ламе становятся комплексными, что, в свою очередь, приводит к комплекснозначности приведенных частот. В этом случае диссипативные свойства материалов конструкции можно определять тангенсами углов потерь отдельно для продольных и поперечных волн $\operatorname{tg} \gamma_p^{(j)}$, $\operatorname{tg} \gamma_s^{(j)}$. При этом $\operatorname{tg} \gamma_p^{(j)} = \frac{\operatorname{Im}(\theta_{j1}^2)}{\operatorname{Re}(\theta_{j1}^2)}$, $\operatorname{tg} \gamma_s^{(j)} = \frac{\operatorname{Im}(\theta_{j2}^2)}{\operatorname{Re}(\theta_{j2}^2)}$.

Учитывая, что наибольшее проявление диссипации энергии устанавливается в верхних асфальтобетонных слоях дорожной конструкции, где данные величины также существенно зависят от температуры окружающей среды. Для численного определения тангенсов углов потерь примем 5-константную модель вязкоупругого материала [29–30], согласно которой

$$E(\omega) = \frac{H}{1 + \frac{d}{(i\omega n)^{k_1}} + \frac{1}{(i\omega n)^{k_2}}} \text{ – комплексный температурно частотно-зависимый модуль}$$

упругости; E – мгновенный модуль упругости, МПа; n – время релаксации материала; d , k_1 , k_2 – экспериментальные параметры модели.

Для асфальтобетона принято: $E = 20\,000$ МПа, $d = 1,7$, $k_1 = 0,2$, $k_2 = 0,5$.

Величина n зависит от температуры и имеет следующий вид:

$$n(T) = \frac{n_0}{\Psi(T)}, \quad \Psi(T) = \exp\left[-\lambda\left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{T_0+273}\right)\right], \quad (7)$$

где n_0 – время релаксации при фиксированной температуре T_0 , °С.

В частности, можно принять: $n_0 = 0,1$, $T_0 = 15$ °С, $\lambda = 25000$.

По заданной величине $E(\omega)$ для j -го материала пересчитаем далее величины коэффициентов Ламе и приведенные частоты, считая значения плотности материала и коэффициента Пуассона постоянными:

$$\lambda_j = \frac{E_j(\omega)v_j}{(1+v_j)(1-2v_j)}, \quad \mu_j = \frac{E_j(\omega)}{2(1+v_j)}. \quad (8)$$

На рис. 2 приведены характерные зависимости тангенса угла потерь продольных волн верхнего слоя асфальтобетона при различных температурах от частоты колебаний, Гц.

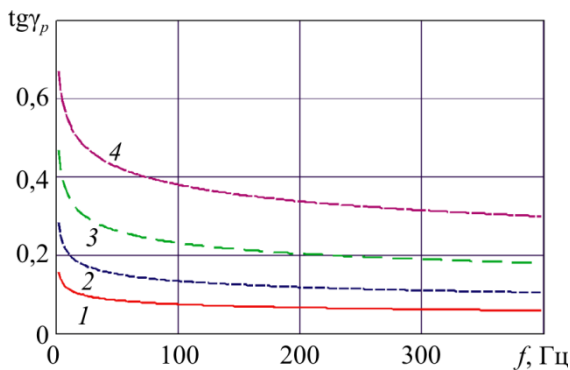


Рис. 2. Зависимость тангенса угла потерь продольных волн от частоты колебаний $tg\gamma_p$:

1 – при $T = 0$ °С; 2 – при $T = 10$ °С;
3 – при $T = 20$ °С; 4 – при $T = 30$ °С

Fig. 2. The dependence of the loss tangent of the longitudinal waves on the frequency of oscillations

$tg\gamma_p$: 1 is for $T = 0$ °С; 2 is for $T = 10$ °С;
3 is for $T = 20$ °С; 4 is for $T = 30$ °С

600 кПа, распределенной по круговому отпечатку диаметром 34 см и движущейся со скоростью 60 км/ч. Расчет плотности рассеиваемой энергии осуществлялся в соответствии с зависимостью

$$W = \int_0^\varepsilon \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}, \quad \text{при } i, j = 1, 2, 3. \quad (9)$$

Физический смысл зависимости (9) сводится к построению расчетной динамической петли гистерезиса на поверхности дорожной конструкции в координатах $\sigma - \varepsilon$ (напряжение – деформация) для всех компонент напряжений. При этом суммарная плотность рассеиваемой энергии W рассчитывается так: $W = \sum_{i,j=1}^3 W_{ij}$, где для W_{ij} в формуле (9) суммирование по индексам не проводится.

Путем дифференцирования по координатам выражения (6) и применения закона Гука аналогично виду (6) в форме двойного интеграла Фурье строится решение для напряжений (σ_{ij}) и деформаций (ε_{ij}) в структуре дорожной конструкции, при этом изменяется вид подынтегральной матрицы К. Вид полученных матриц для подынтегральных выражений отражен в [15].

Основным направлением теоретических исследований с привлечением данной модели явилось изучение закономерностей распределения рассеивания энергии от движения транспортного потока в структуре дорожной конструкции.

При проведении численного моделирования нами рассматривалось динамическое воздействие расчетной нагрузки давлением

В рамках численного эксперимента нами были рассмотрены три варианта дорожных конструкций. Первые два варианта характеризуются значительной прочностью, обеспечивающейся за счет применения в их конструкциях современных материалов и слоев значительной толщины. Как правило, эти варианты дорожных конструкций устраиваются на современных автомагистралях. Третий вариант представляет собой традиционную дорожную конструкцию, устраиваемую на дорогах II-III категорий. Варианты дорожных конструкций представлены в табл. 1–3:

Таблица 1

Конструкция дорожной одежды № 1

Table 1

Structure of pavement Nr. 1

Слой	Толщина, см	Модуль упругости, МПа
Щебеночно-мастичный асфальтобетон ЩМА-15 на ПБВ 60	4	5300
Асфальтобетон плотный тип А I марки на БНД 60/90	8	3200
Асфальтобетон пористый I марки на БНД 60/90	16	2000
Слой из асфальтогранулобетона, укрепленный комплексным вяжущим	20	700
Щебеночно-песчаная смесь, оптимального гранулометрического состава С4	35	240
Грунт земляного полотна-суглинок тяжелый пылеватый		41

Таблица 2

Конструкция дорожной одежды № 2

Table 2

Structure of pavement Nr. 2

Слой	Толщина, см	Модуль упругости, МПа
Щебеночно-мастичный асфальтобетон ЩМА-15 на ПБВ 60	4	5300
Асфальтобетон плотный тип А I марки на БНД 60/90	8	3200
Асфальтобетон пористый I марки на БНД 60/90	16	2000
Щебеночно-песчаная смесь, оптимального гранулометрического состава С4	55	240
Грунт земляного полотна-суглинок тяжелый пылеватый		41

Таблица 3

Конструкция дорожной одежды № 3

Table 3

Structure of pavement Nr. 3

Слой	Толщина, см	Модуль упругости, МПа
Щебеночно-мастичный асфальтобетон ЩМА-15 на ПБВ 60	5	5300
Асфальтобетон пористый тип А I марки на БНД 60/90	7	2000
Асфальтобетон пористый I марки на БНД 60/90	7	2000
Щебеночно-песчаная смесь, оптимального гранулометрического состава С4	35	240
Грунт земляного полотна-суглинок тяжелый пылеватый		41

Расчет плотности рассеянной энергии осуществлялся в критических точках в структуре дорожной конструкции:

- на поверхности покрытия;
- на нижней границе пакета асфальтобетонных слоев;
- на поверхности основания;
- на поверхности рабочего слоя грунта земляного полотна.

Пример результатов имитационного моделирования амплитудно-временных характеристик напряжений и деформаций для дорожной конструкции № 1 приведен на рис. 3–4. На рис. 5–8 представлены полученные динамические петли гистерезиса моделируемых нежестких дорожных конструкций в критических точках дорожной конструкции. Построение петель осуществлялось для всех нормальных напряжений и деформаций, действующих в точке приложения нагрузки.

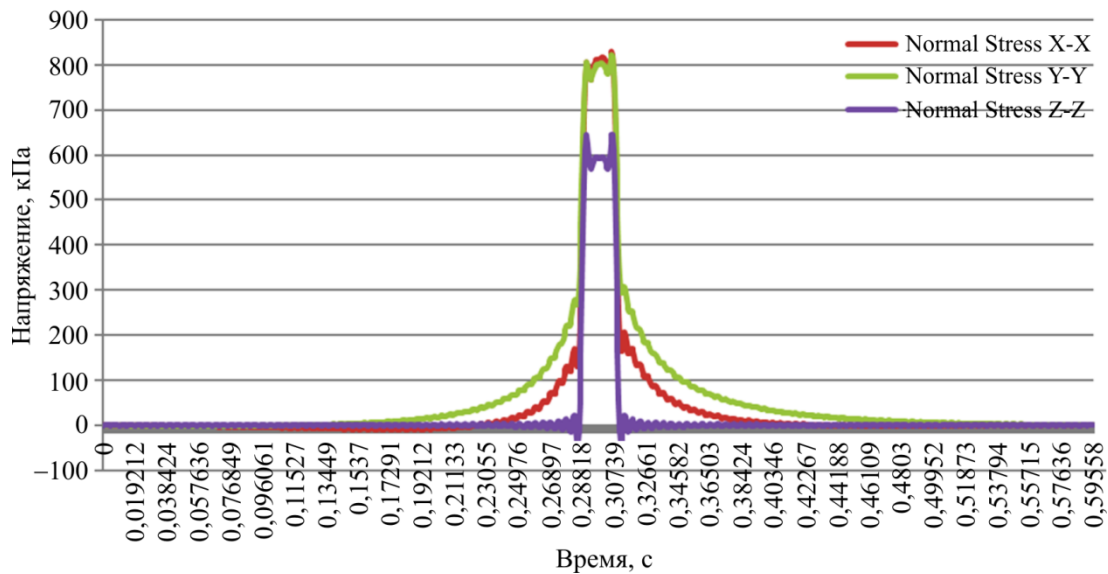


Рис. 3. Нормальные напряжения на поверхности дорожной конструкции № 1
Fig. 3. Normal stresses on the surface of pavement Nr. 1

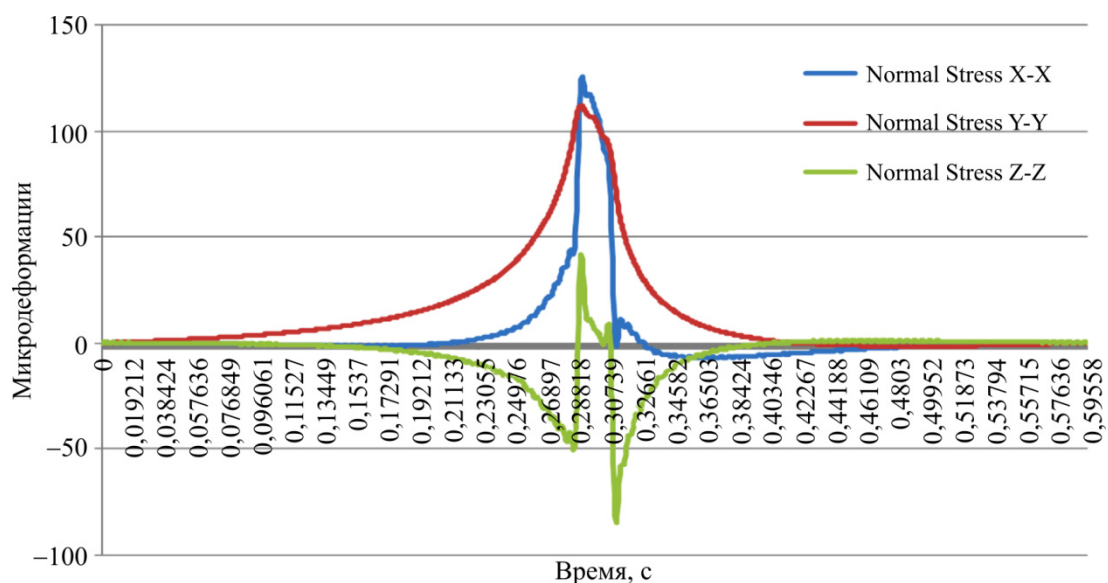


Рис. 4. Нормальные деформации на поверхности дорожной конструкции № 1
Fig. 4. Normal strains on the surface of pavement Nr. 1

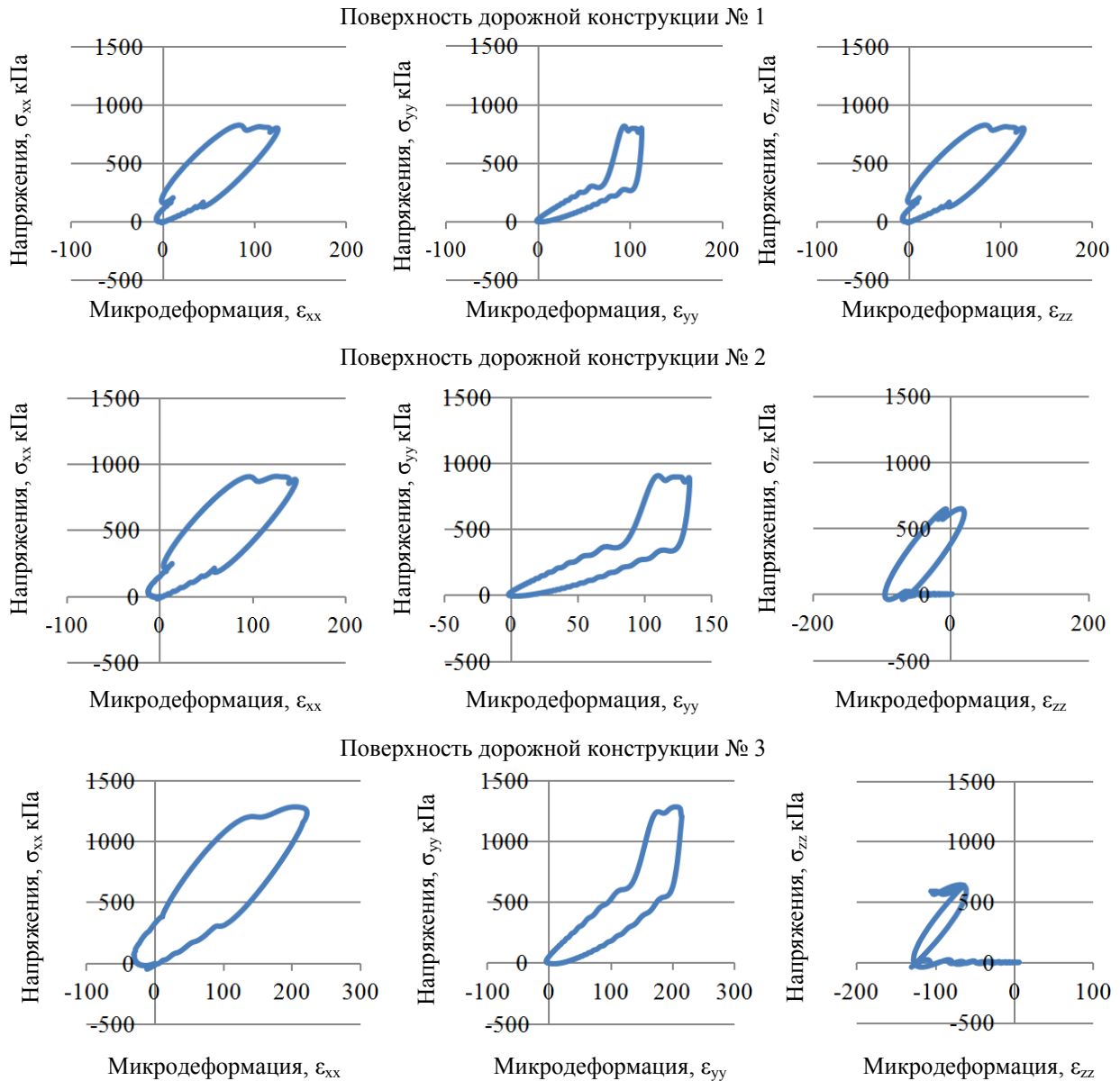


Рис. 5. Результаты моделирования эффекта динамического гистерезиса на поверхности моделируемых дорожных конструкций

Fig. 5. The results of simulating the dynamic hysteresis effect on the lower boundary of the package of asphalt-concrete layers

Анализ представленных на рис. 5–8 и в табл. 4 результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. С увеличением капитальности дорожной конструкции уменьшается плотность энергии, рассеиваемой на ее поверхности. Так, при изменении значения эквивалентного модуля упругости с 340 МПа (конструкция № 3) до 620 МПа (конструкция № 1) суммарная плотность энергии (W_{xx} , W_{yy} , W_{zz}) уменьшается с 223,16 Дж/м³ до 105 Дж/м³.

2. Темпы затухания энергии волновых полей в дорожной конструкции, генерируемой воздействием расчетной нагрузки, в значительной степени отличаются в зависимости от капитальности дорожной одежды и от различных типов конструктивных слоев, из которых она состоит.

3. Для дорожной конструкции № 1 характерно резкое затухание вертикальной составляющей рассеиваемой энергии, что обусловлено высокой жесткостью слоя укрепленного основания. При этом рассеиваемая энергия, направленная на формирование горизонтальных напряжений и деформаций на поверхности основания дорожной конструкции и грунта земляного полотна, превышает аналогичные значения для дорожной конструкции № 2, устроенной на неукрепленном основании.

4. Дорожная конструкция № 3 характеризуется наибольшими значениями плотности рассеиваемой энергии в вертикальном направлении на поверхности всех слоев дорожной конструкции и в горизонтальном направлении (на нижней границе пакета асфальтобетонных слоев), что напрямую связано с низкой капитальностью дорожной конструкции, обусловленной применением менее прочных материалов слоев, чем в конструкциях № 1 и № 2.

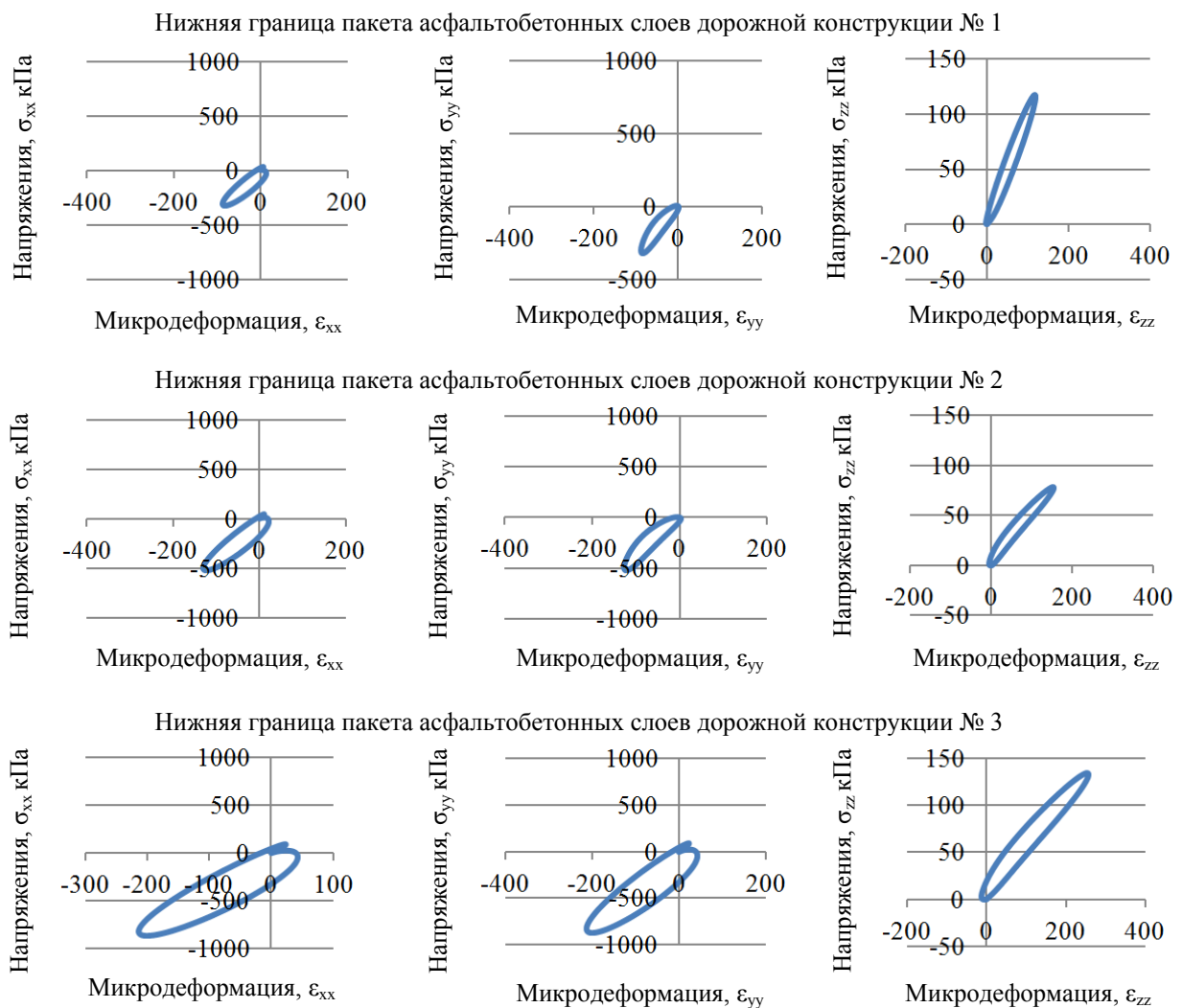


Рис. 6. Результаты моделирования эффекта динамического гистерезиса на нижней границе пакета асфальтобетонных слоев

Fig. 6. The results of simulating the dynamic hysteresis effect on the surface of the simulated pavements

Установленные качественные и количественные закономерности распределения рассеиваемой на поверхности дорожной конструкции плотности энергии, генерируемой расчетной нагрузкой от колеса автотранспортного средства при движении, позволяют предположить возможность суммирования рассеиваемой энергии в структуре дорожной конструкции за весь ее расчетный срок службы ($W_{пр}$). Сопоставляя полученное значение с неким предельно допустимым значением плотности рассеиваемой энергии ($W_{доп}$), можно сформулировать критерий работоспособности дорожной конструкции в виде

$$W_{пр} < W_{доп} \quad (10)$$

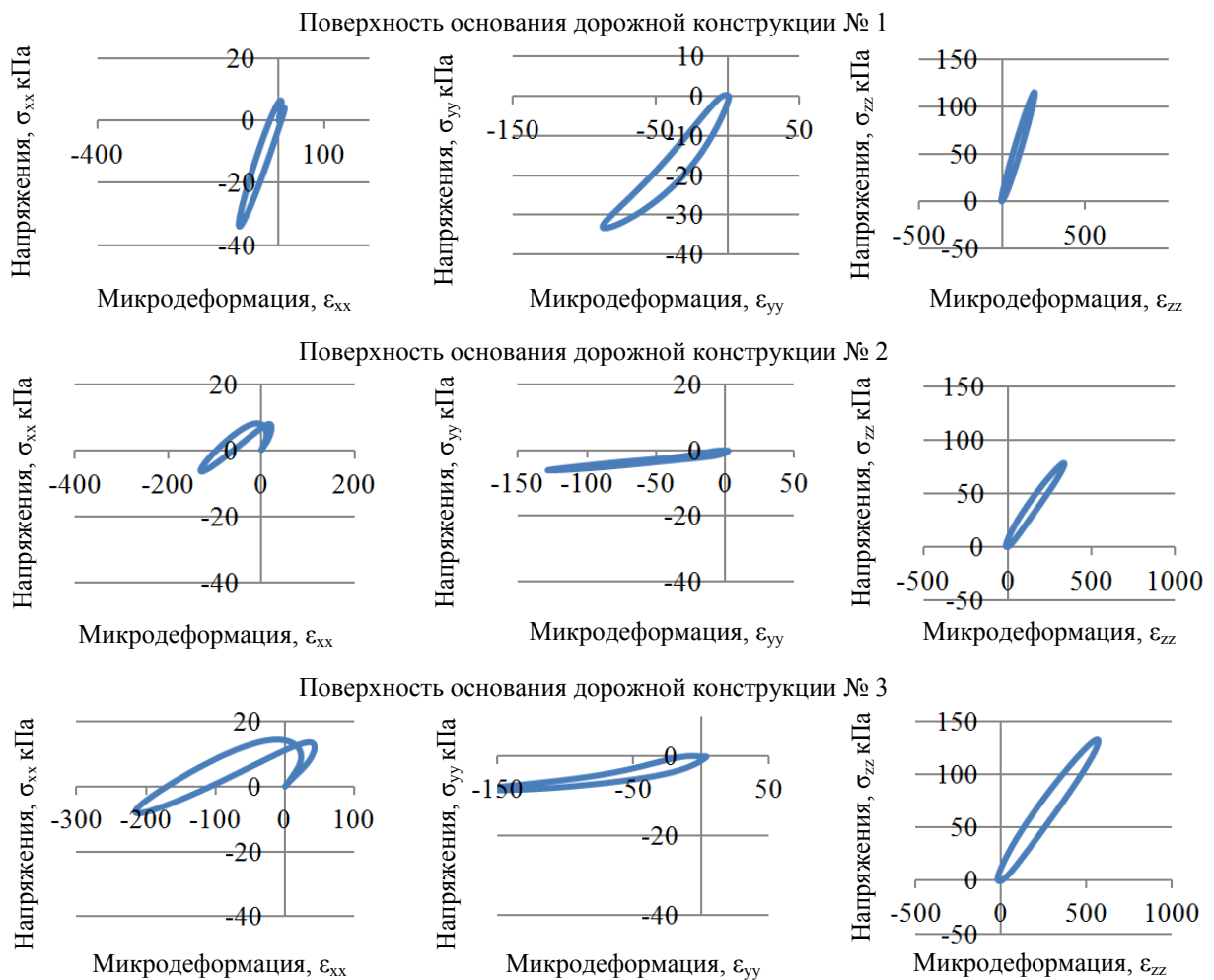


Рис. 7. Результаты моделирования эффекта динамического гистерезиса на поверхности основания моделируемых дорожных конструкций
 Fig. 7. The results of simulating the dynamic hysteresis effect on the surface of the base of the simulated pavements

Расчет дорожной конструкции на соответствие данному критерию может быть осуществлен в соответствии с подходом, представленным на рис. 9. Так, величину предельно допустимого значения плотности рассеиваемой энергии ($W_{доп}$) от расчетной нагрузки предлагается определять путем имитационного моделирования проезда транс-

портных средств с расчетной нагрузкой на заднюю ось в течение расчетного срока службы дорожной одежды по поверхности полупространства, характеризующегося минимально требуемым общим модулем упругости, рассчитанным исходя из суммарного числа приложений расчетной нагрузки. После определения допустимого значения осуществляется конструирование проектной дорожной одежды с заданием перечня исходных параметров в соответствии с рис. 9. На заключительном этапе осуществляется проверка выполнимости критерия (10). Влияние температурных и влажностных факторов на механические параметры дорожной конструкции учитывается изменением модулей упругости материалов слоев асфальтобетона и грунта земляного полотна по временам года в процессе расчета.

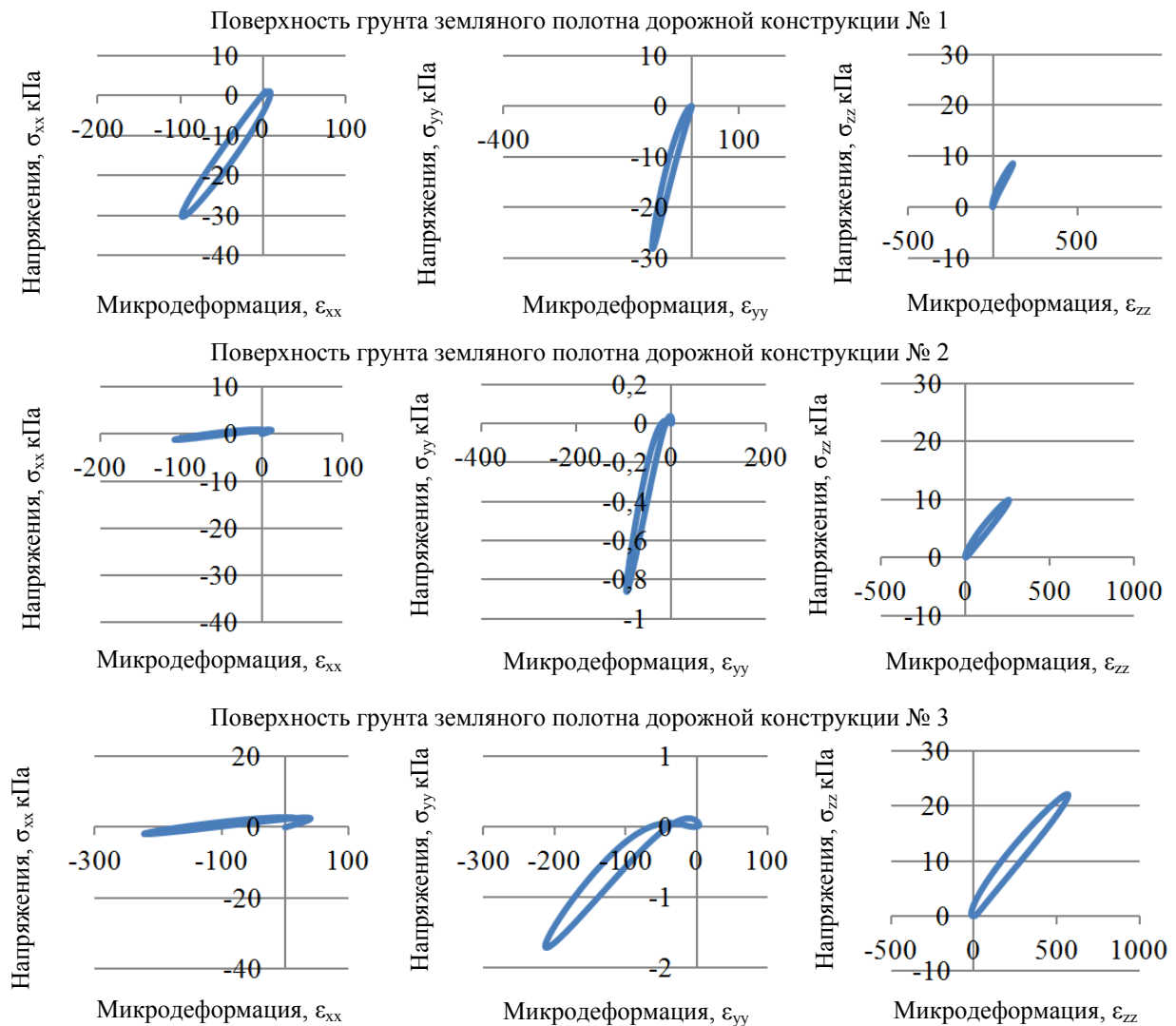


Рис. 8. Результаты моделирования эффекта динамического гистерезиса на поверхности грунта земляного полотна моделируемых дорожных конструкций

Fig. 8. The results of simulating the dynamic hysteresis effect on the surface of the soil subgrade of the simulated pavements

Таблица 4

Результаты расчета рассеиваемой энергии динамического воздействия транспортных средств в структуре моделируемых дорожных конструкций

Table 4

Computational results of the dissipated energy of dynamic impact of vehicles in the structure of the simulated road structures

Критические точки в структуре дорожной конструкции	Рассеиваемая энергия (W) в плоскостях $x-x$, $y-y$, $z-z$, Дж/м ³								
	Конструкция № 1			Конструкция № 2			Конструкция № 3		
	W_{xx}	W_{yy}	W_{zz}	W_{xx}	W_{yy}	W_{zz}	W_{xx}	W_{yy}	W_{zz}
Поверхность конструкции	43	25	37	61	34	32	129	81	13,16
Нижняя граница пакета а/б	13	9,4	3,84	28,8	21,2	4,45	85,9	61,5	13
Поверхность основания	0,9	0,58	3,84	0,4	0,13	4,45	1,2	0,33	13
Поверхность грунта	0,55	0,38	0,15	0,044	0,011	0,4	0,21	0,05	2,05

В случае если критерий не выполняется, то производится корректировка толщин и материалов слоев дорожной конструкции.

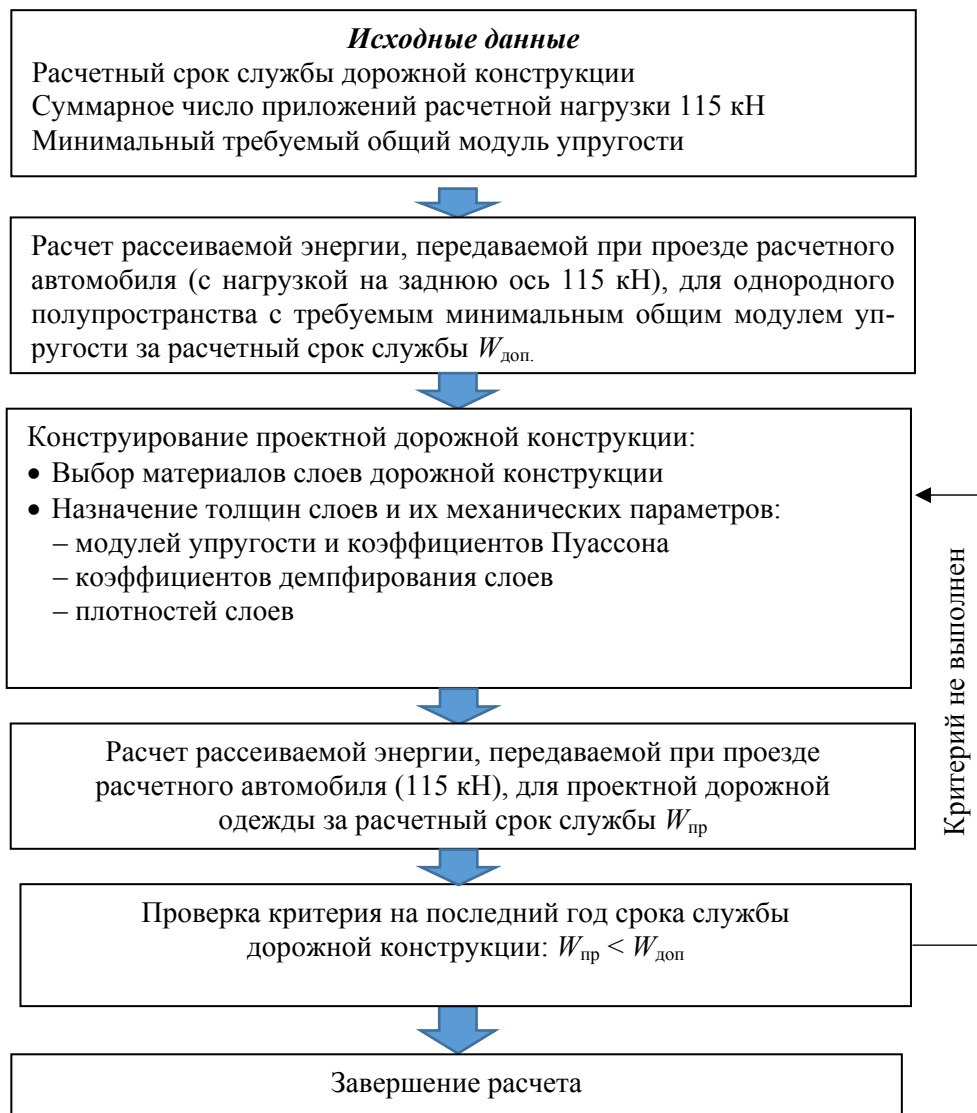


Рис. 9. Расчетный подход к оценке энергетического ресурса нежесткой дорожной конструкции
Fig. 9 The computational approach to the assessment of energy resource of the nonrigid pavement

Выводы

1. Проведено имитационное моделирование динамического воздействия расчетной нагрузки (115 кН), движущейся по поверхности нежесткой дорожной конструкции со скоростью 60 км/ч, в пространственной постановке. На основе результатов моделирования установлено, что темпы затухания энергии волновых полей в дорожной конструкции, генерируемой воздействием расчетной нагрузки, в значительной степени отличаются в зависимости капитальности дорожной одежды и от различных типов конструктивных слоев, из которых она состоит.

2. Установлены качественные и количественные зависимости распределения плотности энергии от движущегося транспортного средства в структуре дорожной конструкции. Для дорожной конструкции № 1 характерно резкое затухание вертикальной составляющей рассеиваемой энергии, что обусловлено высокой жесткостью слоя укрепленного основания. При этом рассеиваемая энергия, направленная на формирование горизонтальных напряжений и деформаций на поверхности основания дорожной конструкции и грунта земляного полотна, превышает аналогичные значения для дорожной конструкции № 2, устроенной на неукрепленном основании.

3. Дорожная конструкция № 3 характеризуется наибольшими значениями плотности рассеиваемой энергии в вертикальном направлении на поверхности всех слоев дорожной конструкции и в горизонтальном направлении (на нижней границе пакета асфальтобетонных слоев), что напрямую связано с низкой капитальностью дорожной конструкции, обусловленной применением менее прочных материалов слоев, чем в конструкциях № 1 и № 2.

4. На основе проведенных исследований сформулирован расчетный подход к определению энергетического ресурса нежесткой дорожной конструкции.

Библиографический список

1. Ворович И.И., Селезнев М.Г., Бабешко В.А. Вибрация штампа на двуслойном основании // ПММ. – 1977. – Т. 41. – Вып. 1. – С. 166–173.
2. Белоконь А.В. К теории динамических задач с подвижными возмущениями для неоднородной упругой полосы // Докл. АН СССР. – 1981. – Т. 261, № 5. – С. 1079–1082.
3. Белоконь А.В. Колебания упругой неоднородной полосы, вызванные движущимися нагрузками // Прикл. математика и механика. – 1982. – Т. 46, № 2. – С. 296–302.
4. Бабешко В.А., Глушков Е.В., Зинченко Ж.В. Динамика неоднородных линейно-упругих сред. – М.: Наука, 1989. – 344 с.
5. Боев С.И., Румянцев А.Н., Селезнев М.Г. Решение задачи о возбуждении волн в упругом двухслойном полупространстве // Методы расширения частотного диапазона вибросейсмических колебаний / Ин-т геол. и геофиз. Сиб. отд-ия АН СССР. – Новосибирск, 1987. – 314 с.
6. Ворович И.И., Александров В.М., Бабешко В.А. Неклассические смешанные задачи теории упругости. – М.: Наука, 1974. – 322 с.
7. Гринченко, В.Т. Равновесие и установившиеся колебания упругих тел конечных размеров. – Киев: Наукова думка, 1978. – 264 с.
8. Приварников А.К., Мерзликин А.Е. Об использовании адаптивных программ интегрирования при решении прикладных задач теории многослойных оснований. Новое в проектировании конструкций дорожных одежд // Тр. СоюздорНИИ. – М., 1988. – С. 22–36.
9. Пряхина О.Д. Нестационарные колебания упругой балки на вязкоупругом основании // Изв. АН СССР. МТТ. – 1992. – № 1. – С. 164–169.
10. Слепян Л.И. Нестационарные упругие волны. – Л.: Судостроение, 1972. – 132 с.

11. Глушков Е.В. Расчет сооружений, заглубленных в грунт. – М.: Стройиздат, 1977. – 265 с.
12. Улитко А.Ф. Метод собственных векторных функций в пространственных задачах теории упругости. – Киев: Наукова думка, 1979. – 261 с.
13. Илиополов С.К., Селезнев М.Г., Углова Е.В. Необходимо разработать новые критерии расчета и конструирования дорожных одежд // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2000. – № 3. – С. 13.
14. Илиополов С.К., Селезнев М.Г., Углова Е.В. Динамика дорожных конструкций: моногр. – Ростов н/Д: Изд-во Рост. гос. строит. ун-та, 2002. – 258 с.
15. Исследование динамических характеристик дорожных конструкций / С.К. Илиополов, М.Г. Селезнев, А.Б. Суворов, Е.В. Углова // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2002. – № 1. – С. 9.
16. Илиополов С.К., Селезнев М.Г. Разработка математических моделей и исследование на их основе энергетических характеристик воздействия автотранспорта на дорожную конструкцию и распределение колебаний в элементах системы «дорожная конструкция–грунт» // Дороги России XXI века. – 2003. – № 8. – С. 49.
17. Medvedeva T.A., Seleznev M.G., Sobisevich A.L. Analysis of wave fields induced in a layered half-space by a moving load // Doklady Physics. – 1999. – Vol. 44. – No. 7. – С. 450–453.
18. Боев С.И., Селезнев М.Г. Об одном подходе в нестационарных задачах теории упругости // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Общественные науки. – 1989. – № 2. – С. 76.
19. Селезнев М.Г., Корабельников Г.Я. Некоторые особенности динамического взаимодействия геологической среды с поверхностными объектами // Изв. Рост. гос. строит. ун-та. – 2004. – № 8. – С. 202.
20. Маринченко Е.В., Селезнев М.Г. Влияние дефектов на количественные и качественные характеристики колебаний элементов строительных конструкций // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2005. – № S1. – С. 17–21.
21. Селезнев М.Г. Аналитические методы в контактных задачах теории упругости // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2004. – № 4. – С. 97.
22. Углова Е.В., Илиополов С.К., Селезнев М.Г. Усталостная долговечность эксплуатируемых асфальтобетонных покрытий. – Ростов-н/Д: Изд-во Рост. гос. строит. ун-та, 2009. – 244 с.
23. Углова Е.В. Моделирование деформирования нежестких дорожных конструкций при воздействии движущегося транспорта / Изв. вузов. Строительство. – 2009. – № 3–4. – С. 87–94.
24. Тиратурян А.Н. Анализ программ для «обратного» расчета модулей упругости конструктивных элементов нежестких дорожных одежд на стадии эксплуатации // Строительство и реконструкция. – 2012. – № 4. – С. 72–78.
26. Смирнов А.В. Теоретические и экспериментальные исследования работоспособности нежестких дорожных одежд: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М.: Изд-во МАДИ, 1991. – 38 с.
27. Смирнов А.В., Илиополов С.К., Александров А.С. Динамическая устойчивость и расчет дорожных конструкций. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2003. – 188 с.
28. Смирнов А.В. Прикладная механика дорожных и аэродромных конструкций: учеб. пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 1993. – 360 с.
29. Hurtgen H. Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik // Zum viskoelastischen und viskoplastischem Verhalten von Asphalt, 2010. – 210 p.
30. Beckedahl H. Forschung strassenbau und strassenverkehrstechnik. Bundesmin. fur Verkehr, Bau- u. Wohnungswesen. Abt. Strassenbau, Strassenverkehr, 1995, 250 p.

References

1. Vorovich, I.I. Vibratsiia shtampa na dvasloinom osnovanii [Vibration of the die on a double-ply substrate]. *Prikladnaia matematika i mekhanika*, 1977, vol. 41, iss. 1, pp. 166-173
2. Belokon' A.V. K teorii dinamicheskikh zadach s podvizhnymi vozmushcheniiami dlia neodnorodnoi uprugoi polosy [To the theory of dynamic problems with mobile perturbations for a non-homogeneous elastic strip]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1981, vol. 261, no 5, pp. 1079-1082.

3. Belokon' A.V. Kolebaniia uprugoi neodnorodnoi polosy, vyzvannye dvizhushchimisia nagruzkami [Oscillations of an elastic inhomogeneous band caused by moving loads]. *Prikladnaia matematika i mekhanika*. 1982, vol. 46, no. 2, pp. 296-302.
4. Babeshko V.A., Glushkov E.V., Zinchenko Zh.V. Dinamika neodnorodnykh lineino-uprugikh sred [Dynamics of inhomogeneous linearly elastic media]. *Moscow, Nauka*, 1989, 344 p.
5. Boev S.I., Rumiantsev A.N., Seleznev M.G. Reshenie zadachi o vozbuзhdenii voln v uprugom dvukhsloinom poluprostranstve [Solution of the problem of wave excitation in an elastic two-layer half-space]. *Novosibirsk, Sbornik: "Metody rasshirenii chastotnogo diapazona vibroseismicheskikh kolebanií"*, Institut geologii i geofiziki Sibirskogo otdeleniia akademii nauk SSSR, 1987, 314 p.
6. Vorovich I.I., Aleksandrov V.M., Babeshko V.A. Neklassicheskie smeshannye zadachi teorii uprugosti [Nonclassical mixed problems of the theory of elasticity]. *Moscow, Nauka*, 1974, 322 p.
7. Grinchenko V.T. Ravnovesie i ustanovivshiesia kolebaniia uprugikh tel konechnykh razmerov [Equilibrium and steady-state oscillations of elastic bodies of finite dimensions]. *Kiev, Naukova Dumka*, 1978, 264 p.
8. Privarnikov A.K. Ob ispol'zovanii adaptivnykh programm integrirovaniia pri reshenii prikladnykh zadach teorii mnogosloinnykh osnovanii. Novoe v proektirovanii konstruksii dorozhnykh odezhd [On the use of adaptive integration programs in solving applied problems in the theory of multilayered bases. New in the design of pavement designs]. *Moscow, Trudy Soiuzdornii*, 1988, pp. 22-36
9. Priakhina O.D. Nestatsionarnye kolebaniia uprugoi balki na viazkouprugom osnovanii [Nonstationary vibrations of an elastic beam on a viscoelastic base]. *Moscow, Izvestiia Akademii nauk SSSR, Mekhanika tverdogo tela*, 1992, no. 1, pp. 164-169.
10. Grinchenko V.T. Ravnovesie i ustanovivshiesia kolebaniia uprugikh tel konechnykh razmerov [Equilibrium and steady-state oscillations of elastic bodies of finite dimensions]. *Kiev, Naukova Dumka*, 1978, 264 p.
11. Slepian L.I. Nestatsionarnye uprugie volny [Nonstationary elastic waves]. *Leningrad, Sudostroenie*, 1972, 132 p.
12. Glushkov E.V. Raschet sooruzhenii zaglublennykh v grunt [Calculation of structures buried in the ground]. *Moscow, Stroizdat*, 1977, 265 p.
13. Ulitko A.F. Metod sobstvennykh vektornykh funktsii v prostranstvennykh zadachakh teorii uprugosti [The method of eigenvector functions in the spatial problems of the theory of elasticity]. *Kiev, Naukova dumka*, 1979, 261 p.
14. Iliopolov S.K., Seleznev M.G., Uglova E.V. Neobkhdimo razrabotat' novye kriterii rascheta i konstruirovaniia dorozhnykh odezhd [It is necessary to develop new criteria for the calculation and design of road clothes]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli*, 2000, no. 3. pp. 5-18.
15. Iliopolov S.K., Seleznev M.G., Uglova E.V. Dinamika dorozhnykh konstruksii: Monografiia [Dynamics of road structures: Monograph]. *Rostov-na-Donu, Rostovskii gosudarstvennyi stroitel'nyi universitet*, 2002, 258 p.
16. Iliopolov S.K., Seleznev M.G., Suvorov A.B., Uglova E.V. Issledovanie dinamicheskikh kharakteristik dorozhnykh konstruksii [Investigation of dynamic characteristics of road structures]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli*, 2002, no. 1. pp. 11-20.
17. Iliopolov S.K., Seleznev M.G. Razrabotka matematicheskikh modelei i issledovanie na ikh osnove energeticheskikh kharakteristik vozdeistviia avtotransporta na dorozhniu konstruksii i raspredelenie kolebanií v elementakh sistemy «dorozhnaia konstruksii-grunt» [Development of mathematical models and research based on them on the energy characteristics of the impact of vehicles on the road structure and the distribution of vibrations in the elements of the system "road construction-ground"]. *Dorogi Rossii XXI veka*, 2003, no 8. pp. 49-55.
18. Medvedeva T.A., Seleznev M.G., Sobisevich A.L. Analysis of wave fields induced in a layered half-space by a moving load. *Doklady Physics*, 1999, vol. 44, no. 7, pp. 450-453.
19. Boev S.I., Seleznev M.G. Ob odnom podkhode v nestatsionarnykh zadachakh teorii uprugosti [On an approach in the nonstationary problems of the theory of elasticity]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Serii: Obshchestvennye nauki*, 1989, no. 2, pp. 76-83.
20. Seleznev M.G., Korabel'nikov G.Ia. Nekotorye osobennosti dinamicheskogo vzaimodeistviia geologicheskoi sredy s poverkhnostnymi ob'ektami [Some features of the dynamic interaction of the geological environment with surface objects]. *Izvestiia Rostovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*, 2004, no. 8, pp. 202-212.
21. Marinchenko E.V., Seleznev M.G. Vliianie defektov na kolichestvennye i kachestvennye kharakteristiki kolebanií elementov stroitel'nykh konstruksii [Influence of defects on the quantitative and qualitative characteristics of vibrations of elements of building structures]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Serii: Estestvennye nauki*, 2005, no. S1, pp. 17-21

22. Seleznev M.G. Analiticheskie metody v kontaknykh zadachakh teorii uprugosti [Analytical methods in contact problems of the theory of elasticity]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Estestvennye nauki*, 2004, no. 4, pp. 97-110.

23. Uglova E.V., Iliopolov S.K., Seleznev M.G. Ustalostnaia dolgovechnost' ekspluatiruemykh asfal'tobetonnykh pokrytii [Fatigue life of exploited asphalt-concrete coatings]. *Rostov-na-Donu, Rostovskii gosudarstvennyi stroitel'nyi universitet*, 2009, p. 244.

24. Uglova E.V. Modelirovanie deformirovaniia nezhestkikh dorozhnykh konstruksii pri vozdeistvii dvizhushchegosia transporta [Modeling of deformation of nonrigid road structures under the influence of moving vehicles]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*, 2009, no. 3-4, pp. 87-94.

25. Tiraturian A.N. Analiz programm dlia «obratnogo» rascheta modulei uprugosti konstruktivnykh elementov nezhestkikh dorozhnykh odezhd na stadii ekspluatatsii [Analysis of programs for the "inverse" calculation of the elastic moduli of structural elements of non-rigid pavements during the operation phase]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiia*, 2012, no. 4, pp. 72-78.

26. Smirnov A.B. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniia rabotosposobnosti nezhestkikh dorozhnykh odezhd [Theoretical and experimental studies of the performance of non-rigid pavements.]. *Avtoreferat dissertatsii nasoiskanie uchenoi stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. Moskva, Moskovskii avtomobil'no-dorozhnyi institut*, 1991, 38 p.

27. Smirnov A.V., Iliopolov S.K., Aleksandrov A.S. Dinamicheskaia ustoichivost' i raschet dorozhnykh konstruksii [Dynamic stability and calculation of road structures]. *Omsk, Izdatel'stvo Sibirskoi gosudarstvennoi avtomobil'no-dorozhnoi akademii*, 2003, 188 p.

28. Smirnov A.B. Prikladnaia mekhanika dorozhnykh i aerodromnykh konstruksii: Ucheb. posobie [Applied mechanics of road and airfield structures: Proc. Allowance]. *Omsk, Izdatel'stvo Omskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 1993, 360 p.

29. Hurtgen H. Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik. *Zum viskoelastischen und viskoplastischem Verhalten von Asphalt*, 2010 210 p.

30. Beckedahl H. Forschung strassenbau und strassenverkehrstechnik. *Bundesmin. fur Verkehr, Bau- u. Wohnungswesen. Abt. Strassenbau, Strassenverkehr*, 1995, 250 p.