Тиратурян А.Н., Ляпин А.А., Углова Е.В. Совершенствование неразрушающего метода определения механических характеристик элементов многослойных конструкций на примере дорожных одежд // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 1. С. 56–65. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.06

Tiraturyan A.N., Lyapin A.A., Uglova E.V. Improvement of the non-destructive method for determining the mechanical characteristics of elements of multilayer structures on the example of pavements. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2023, no. 1, pp. 56-65. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.06

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 1, 2023
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.06
УДК 625.7/.8

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ПРИМЕРЕ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

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

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

О СТАТЬЕ

Получена: 03 марта 2022 г.
Одобрена: 09 февраля 2023 г.
Принята к публикации:
05 апреля 2023 г.

Ключевые слова:

диссипация энергии, многослойная конструкция, модуль упругости, петля гистерезиса, установка ударного нагружения.

АННОТАЦИЯ

Рассматривается актуальная проблема совершенствования метода неразрушающего контроля состояния нежестких дорожных одежд. В дополнение к разработанному ранее подходу к определению механических параметров материалов конструктивных слоев нежестких дорожных одежд на основе решения обратной коэффициентной задачи о восстановлении эксплуатационных модулей упругости, обеспечивающих заданные поля смещений, был разработан подход, позволяющий определять параметры рассеяния энергии в структуре многослойной дорожной одежды на основе корректировки динамических петель гистерезиса, регистрируемых в полевых условиях и рассчитываемых с использованием математической модели динамического НДС. Приведены результаты численного моделирования динамических петель гистерезиса для двух различных вариантов многослойных конструкций. Показаны возможности корректировки формы петель гистерезиса и их площади путем варьирования тангенсов углов потерь энергии в слоях многослойной среды и модуля упругости однородного полупространства. Комплексная корректировка значений модулей упругости конструктивных слоев дорожных одежд и расчетных петель динамического гистерезиса позволила полностью учесть процессы затухания энергии на удалении от точки приложения нагрузки. В ходе корректировки было установлено, что значения модулей упругости слоев дорожной одежды и тангенсов углов потерь в них оказывают комплексное влияние на площади динамических петель гистерезиса и характера затухания энергии на удалении от точки приложения нагрузки. При этом в наибольшей степени на площадь динамических петель гистерезиса влияние оказывает модуль упругости подстилающего полупространства, не ограниченного по толщине (что привело к увеличению модуля упругости подстилающего полупространства со 120 и 150 МПа для вариантов дорожной конструкции с укрепленным и неукрепленным основанием до 170 и 160 МПа соответственно), а уменьшение рассеиваемой энергии на удалении от точки приложения нагрузки связано, в первую очередь, с тангенсом угла потерь энергии в полупространстве. Полученные значения тангенсов углов потерь, очевидно, связаны с закономерностями рассеяния энергии на границах контактирующих слоев дорожной одежды, а также учитывают все возможные аномалии и расслоения в рассчитываемых конструкциях В рамках данной статьи впервые получены расчетные петли гистерезиса на поверхности дорожной одежды, рассчитана энергия деформирования, исходя из их площадей, и доказана возможность их сопоставления с зарегистрированными экспериментально.

© ПНИПУ

© **Тиратурян Артем Николаевич** – д.т.н., доц., e-mail: tiraturjan@list.ru, ID: 0000-0001-5912-1235.
Ляпин Александр Александрович – д.ф.-м.н., проф., e-mail: lyapin.rnd@yandex.ru, ID: 0000-0001-8573-721X.
Углова Евгения Владимировна – д.т.н., проф., e-mail: uglova.ev@list.ru, ID: 0000-0003-4768-2427.

Artem N. Tiraturyan – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: tiraturjan@list .ru, ID: 0000-0001-5912-1235.
Alexander A. Lyapin – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Department,
e-mail: lyapin.rnd@yandex.ru, ID: 0000-0001-8573-721X.
Evgenia V. Uglova – Doctor of Technical Sciences, Professor, e -mail: uglova.ev@list.ru, ID: 0000-0003-4768-2427.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

IMPROVEMENT OF THE NON-DESTRUCTIVE METHOD FOR DETERMINING THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ELEMENTS OF MULTILAYER STRUCTURES ON THE EXAMPLE OF PAVEMENTS

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

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

ARTICLE INFO

Received: 03 March 2022
Approved: 09 February 2023
Accepted for publication:
05 April 2023

Keywords:

energy dissipation, multilayer structure, modulus of elasticity, hysteresis loop, shock loading installation.

ABSTRACT

The article is devoted to solving the urgent problem of improving the method of non-destructive testing of the condition of non-rigid road clothes. In addition to the previously developed approach to determining the mechanical parameters of materials of structural layers of non-rigid road coverings based on solving the inverse coefficient problem of restoring operational elastic modules providing specified displacement fields, an approach was developed that allows determining the parameters of energy dissipation in the structure of multilayer road pavement based on the correction of dynamic hysteresis loops recorded in the field and calculated using mathematical model of dynamic VAT. The article presents the results of numerical simulation of dynamic hysteresis loops for two different variants of multilayer structures. The possibilities of correcting the shape of hysteresis loops and their area by varying the tangents of the energy loss angles in layers of a multilayer medium and the elastic modulus of a homogeneous half-space are shown. The complex correction of the elastic modulus values of the structural layers of road clothes and the calculated loops of dynamic hysteresis made it possible to fully take into account the processes of energy attenuation at a distance from the point of application of the load. During the correction, it was found that the values of the elastic modulus of the road layers and the tangents of the loss angles in them have a complex effect on the areas of dynamic hysteresis loops and the nature of energy attenuation at a distance from the point of application of the load. At the same time, the elastic modulus of the underlying half-space is not limited in thickness to the greatest extent on the area of dynamic hysteresis loops (which led to an increase in the elastic modulus of the underlying half-space from 120 and 150 MPa for road construction variants with a reinforced and non-reinforced base to 170 and 160 MPa, respectively), and a decrease in the dissipated energy at a distance from the point of application This is primarily due to the tangent of the angle of energy loss in the half-space. The obtained values of the tangents of the loss angles are obviously related to the patterns of energy dissipation at the boundaries of the contacting layers of the pavement, and also take into account all possible anomalies and delaminations in the calculated structures. Within the framework of this article, calculated hysteresis loops on the surface of the pavement were obtained for the first time, the deformation energy was calculated based on their areas, and the possibility of their comparison with those registered experimentally was proved.

© PNRPU

Введение

Многослойные среды находят широкое распространение в инженерной и строительной практике. Одним из часто встречающихся видов многослойных сред являются дорожные одежды на автомобильных дорогах. Дорожная одежда – один из наиболее ответственных и дорогостоящих элементов автомобильной дороги, призванных обеспечить как комфорт движения и безопасность пользователей автомобильной дороги, так и ее долговечность в пределах всего расчетного срока службы. Как правило, они включают в себя слои асфальтобетонного покрытия, слои основания, обработанного или не обработанного вяжущими материалами, а также слои из инертных материалов, выполняющие функции дополнительного слоя или рабочей зоны грунта земляного полотна. При деформировании слои дорожной одежды проявляют достаточно широкий спектр свойств, объединяющий механизмы упругого и вязкоупругого деформирования, что приводит к сложностям при оценке их состояния на этапе эксплуатации [1–3]. На данный момент основным методом неразрушающего контроля, применяемым на стадии эксплуатации и позволяющим оценить жесткостные свойства отдельных элементов, является метод «обратного» расчета, базирующийся на решении обратной коэффициентной задачи восстановления модулей упругости по замеренной в полевых условиях чаше упругих прогибов [4–8]. Данный подход имеет как серьезные достоинства, определившие его широкое внедрение в мировой практике, но вместе с тем и определенные недостатки, связанные с некоторой идеализацией исследуемых сред. Главным достоинством данного метода является возможность получения конкретных расчетных механических параметров слоев дорожной конструкции, которые в дальнейшем могут быть использованы для принятия проектных решений и расчетов усиления конструкций в рамках капитального ремонта [9–11]. К недостаткам можно отнести применение достаточно сложного математического аппарата и неоднозначность способов преодоления некорректности задачи. К таким способам можно отнести численные итерационные методы типа

Ньютона, Левенберга – Марквардта, генетические алгоритмы [12–15]. В виде отдельного научного направления в последние годы выделилось применение искусственных нейронных сетей [16–19], однако здесь первоочередной проблемой является адекватность и полнота данных, на которых происходит их обучение. Поэтому, резюмируя вышесказанное, следует отметить, что, на наш взгляд, дальнейшее развитие данного класса методов должно базироваться на более полном учете физической природы механизмов деформирования конструктивных слоев под воздействием нагрузок. Это приводит к заключению, что наряду с модулями упругости очевидна необходимость восстановления и параметров потерь энергии деформирования [20–23], что в рамках реализованных на данный момент методов не представляется возможным. Исходя из этого целью данной работы является разработка метода определения параметров упругости и потерь отдельных конструктивных слоев дорожных одежд, по замеренным в полевых условиях петлях динамического гистерезиса.

1. Методы

Энергетический баланс в упругой многослойной среде может быть представлен в следующем виде [24; 25]:

$$W = W_{\nu,z} + W_{R,z}, \tag{1}$$

где W – общий поток энергии, закачиваемой в среду; $W_{\nu,z}$ – энергия, уносимая от источника колебаний продольными волнами и волнами сдвига; $W_{R,z}$ – энергия, уносимая волнами Рэлея на бесконечность.

Величина потока энергии продольных и поперечных волн может быть определена в соответствии со следующим соотношениями:

$$W_{\nu,z} = -\frac{\omega}{4\pi}\int_0^{\chi} \operatorname{Im} R(\alpha,0)\,|\,Q_3(\alpha)\,|^2\ \alpha d\alpha, \tag{2}$$

$$W_{R,z} = -\frac{\omega}{4} r\,\mathrm{e}\,s R(\alpha,0)\,|_{\alpha=\xi}|\,Q_3(\xi)\,|^2\ \xi; \tag{3}$$

где $R(\alpha,0)$ – функция, входящая в состав символаматрицы Грина, построенной для упругого полупространства [25]; Q_3 – Фурье-образ вертикальной компоненты нагружения на поверхности многослойной среды; ω – круговая частота; χ – верхний предел зоны комплекснозначности; α,ζ – Фурье-образы координаты движения поверхностной нагрузки.

Вместе с тем для случая многослойного вязкоупругого полупространства зависимость (1) может быть представлена в виде:

$$W = W_{\nu,z} + W_{R,z} + W_{loss} \tag{4}$$

где W_{loss} – величина энергии потерь, связанная с проявлением вязких свойств конструктивных слоев многослойной конструкции.

В свою очередь энергия потерь W_{loss} с позиции анализа экспериментальных данных распадается на отдельные составляющие и может быть представлена в виде:

$$W_{loss} = W_{\text{вязк}} + W_{\text{разр}} + W_{\text{темп}}, \tag{5}$$

где $W_{\text{вязк}}$ – величина энергии потерь, затрачиваемая на вязкоупругое деформирование материала; $W_{\text{разр}}$ – величина энергии потерь, рассеиваемая при различных аномалиях дефектах и разрушениях в теле материала; $W_{\text{темп}}$ – энергия, необратимо рассеянная в пространстве в виде тепла.

Таким образом, можно заключить, что величина энергии потерь однозначно характеризует структурные свойства всей конструкции в целом и отдельных элементов ее конструктивных слоев и является эффективным индикатором состояния слоистой конструкции.

С практической точки зрения учет энергии потерь при деформировании многослойной конструкции может быть полезен при решении задачи восстановления характеристик слоев многослойной дорожной конструкции неразрушающим методом. Так, стандартная постановка обратной коэффициентной задачи о минимизации функционала

$$\min \Phi(E_j) = \min \sum_i \left| U^{\text{эксп}}(R_i) - U^{\text{расч}}(E_j, R_i) \right|^2 \tag{6}$$

может быть дополнена требованием минимума функционала $\min W^*$:

$$W^* = \min \sum_i \left| \int_0^t \sigma^{\text{эксп}}(R_0)\dot{\varepsilon}^{\text{эксп}}(R_i)dt - \int_0^t \sigma^{\text{расч}}(R_0)\dot{\varepsilon}^{\text{расч}}(R_i)dt \right|, \tag{7}$$

где $U^{\text{эксп}}(R_i)$ – функция, описывающая форму чаши упругих прогибов на поверхности многослойной среды, зарегистрированных на расстояниях R_i от точки приложения ударной нагрузки; $U^{\text{расч}}(E_i, R_i)$ – функция, описывающая зависимость расчетных значений упругих прогибов от значений модулей упругости конструктивных слоев многослойно среды, строящаяся с использованием математической модели динамического НДС; R_0 – центр приложения нагрузки; $\sigma^{\text{эксп}}, \varepsilon^{\text{эксп}}$ – напряжения и деформации поверхности дорожной конструкции, регистрируемые при экспериментальном нагружении; $\sigma^{\text{расч}}, \varepsilon^{\text{расч}}$ – напряжения и деформации поверхности дорожной конструкции, рассчитываемые с использованием математической модели.

Итоговый вид минимизируемого функционала соответствует аналогу процесса регуляризации по Тихонову и можно записать следующим образом:

$$M = \Phi + \lambda W^*, \tag{8}$$

где λ – параметр регуляризации.

Построение зависимостей вида $\sigma^{\text{расч}}(\varepsilon^{\text{расч}})$ для случая определения НДС многослойного вязкоупругого полупространства затруднительно, в связи с отсутствием нормированных параметров затухания как отдельных слоев дорожной конструкции, так и ее в целом. Таким образом, в отличие от модулей упругости, где точка отсчета в виде начальных значений модулей упругости, на основе которых строится расчетная чаша прогибов, существует, здесь – отсутствует. Однако применение современного измерительного оборудования в виде установок динамического нагружения с падающим грузом позволяет осуществлять регистрацию динамических петель гистерезиса на поверхности дорожной одежды в координатах «нагрузка (F) – перемещение (u)» $F^{\text{эксп}}(u^{\text{эксп}})$ [26; 27]. Площади, зарегистрированных таким образом петель гистерезиса, служат аналогом величины диссипации энергии на удалении от точки приложения нагрузки.

В расчетной модели представляется возможным аналогичное представление $F^{\text{расч}}(u^{\text{расч}})$ путем наложения расчетного импульса силы $F(t)$, подчиняющегося синусоидальному закону на амплитудно-временную характеристику деформирования на поверхности многослойной среды $\mathbf{u}(\mathbf{R},t)$:

$$F(t)=\begin{cases}\dfrac{F_0}{\pi R^2}\sin\left(\dfrac{\pi t}{t_{\text{имп}}}\right), t\in[0,t_{\text{имп}}];\\ 0, t\notin[0,t_{\text{имп}}],\end{cases} \tag{9}$$

где F_0 – усилие на поверхности конструкции, распределенное по пятну контакта радиусом R; $t_{\text{имп}}$ – время импульса ($t_{\text{имп}}$=30 мс).

Форма амплитудно-временной характеристики перемещений может быть получена путем разложения функции внешней нагрузки $F(t)$ во временной ряд Фурье;

$$\mathbf{u}(\mathbf{R},t)=\sum_{k=1}^{M}p_k\left\{-\cos\eta_k\,\mathrm{Im}\left[\mathbf{u}(\mathbf{R},\omega_k)\exp(-i\omega_k t)\right]+\right.$$
$$\left.+\sin\eta_k\,\mathrm{Re}\left[\mathbf{u}(\mathbf{R},\omega_k)\exp(-i\omega_k t)\right]\right\}, \tag{10}$$

где p_k – коэффициенты разложения импульса ударного нагружения в ряд Фурье; ω_k – набор круговых частот, определяемый исходя из параметров импульса приложения нагрузки; η_k – параметр фазового сдвига, определяемый исходя из набора круговых частот ω_k.

Более подробно механизм решения задачи об определении динамического НДС многослойной среды изложен в работах [28–30]. В качестве меры диссипации энергии в данной статье будет использоваться тангенс угла потерь энергии $\mathrm{tg}\varphi$.

2. Результаты

Инструментальные исследования были проведены на участке автомобильной дороги М4 «ДОН» км 933–1024. Конструкция дорожной одежды на обследованных участках включала в себя слои асфальтобетона толщиной 20–35 см, слои основания из неукрепленной вяжущим щебеночно-песчаной смеси толщиной 30–40 см и грунта земляного полотна. Помимо представленной конструкции на локальных участках встречались слои из щебеночно-песчаной смеси, укрепленной цементом, толщиной 15–24 см. В рамках данной статьи рассмотрены два варианта конструкции дорожной одежды, содержащей слой основания, укрепленный цементом, и со слоем основания, не обработанным вяжущим (табл. 1).

Таблица 1

Конструкция дорожной одежды на опытных участках

Table 1

Construction of pavement on experimental sites

Конструкция дорожной одежды с неукрепленным основанием	Толщина слоя, см	Конструкция дорожной одежды с укрепленным основанием	Толщина слоя
Асфальтобетон	34	Асфальтобетон	17
Щебеночно-песчаная смесь	35	Щебеночно-песчаная смесь, укрепленная цементом	17
Грунт – глина	-	Щебеночно-песчаная смесь	41
		Грунт	-

Экспериментальные измерения чаш упругих прогибов осуществлялись с использованием установки динамического нагружения с падающим грузом FWD PRIMAX 1500, оснащенной комплектом датчиков-геофонов для регистрации чаш упругих прогибов[1].

Экспериментальные чаши упругих прогибов, зарегистрированные на данных участках, а также расчетные (построенные в программном комплексе АЭМ) представлены на рис. 1.

Результаты расчета динамических модулей упругости представлены в табл. 2.

Также были экспериментально зарегистрированы (рис. 2) и построены с использованием математической модели петли гистерезиса для каждого из датчиков установку динамического нагружения с падающим грузом (рис. 3).

Как видно из представленных рисунков, при схожем форм-факторе расчетных и экспериментальных петель динамического гистерезиса присутствует отличие в величине их площади. Это наглядно продемонстрировано в табл. 3, в которой приведено сопоставление расчетных и экспериментальных площадей петель гистерезиса. Так как площадь петли гистерезиса определя-

[1] Расстояния установки датчиков измерителей прогиба: 0–0,20–0,30–0,45–0,60–0,90–1,20–1,50–1,80–2,10 м от точки приложения нагрузки.

ется процессами диссипации энергии в структуре дорожной одежды была произведена итоговая корректировка значений тангенсов углов потерь в слоях дорожных конструкций для минимизации отклонений площадей петель гистерезиса (табл. 4).

Результаты корректировки в виде расчетных петель динамического гистерезиса приведены на рис. 4. Итоговые значения модулей упругости слоев дорожной одежды и тангенсов углов потерь энергии в конструктивных слоях приведены в табл. 5.

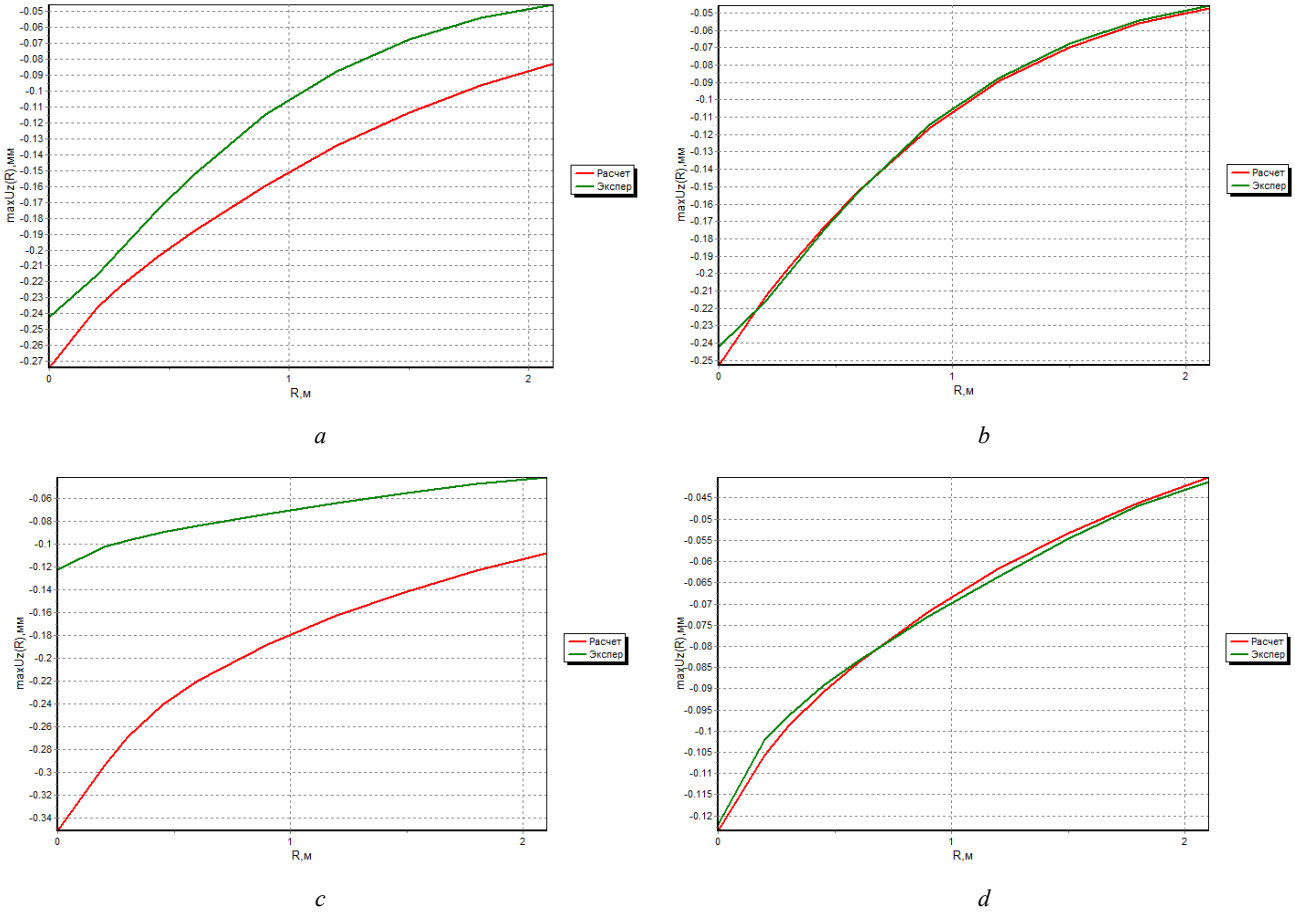


Рис. 1. Расчетные и экспериментальные чаши прогибов до и после корректировки (*a*, *b* – для дорожной одежды с неукрепленным основанием соответственно; *c*, *d* – с укрепленным)

Fig. 1. Calculated and experimental bowls of deflections before and after adjustment (*a*, *b* – for pavement with unreinforced base, respectively; *c*, *d* – with reinforced)

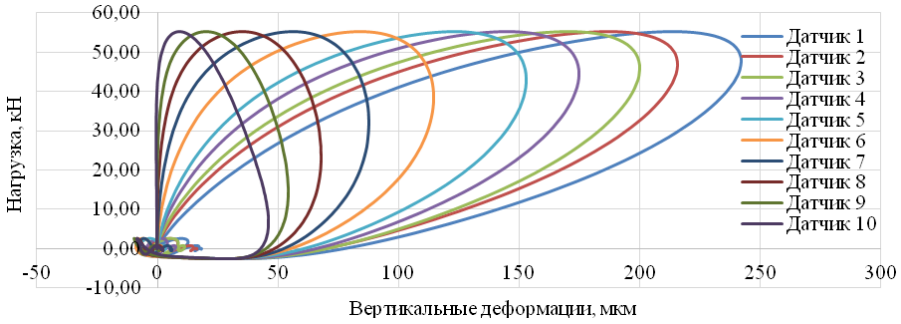
Таблица 2

Значения модулей упругости конструктивных слоев дорожных одежд после корректировки

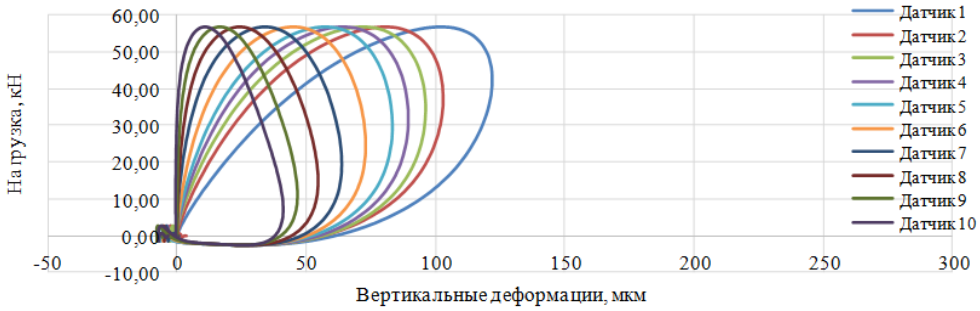
Table 2

Values of modulus of elasticity of structural layers of pavements after adjustment

Конструкция дорожной одежды с неукрепленным основанием	Динамический модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды с укрепленным основанием	Динамический модуль упругости, МПа
Асфальтобетон	2870	Асфальтобетон	6400
Щебеночно-песчаная смесь	80	Щебеночно-песчаная смесь, укрепленная цементом	5000
Грунт – глина	120	Щебеночно-песчаная смесь	600
		Грунт	150



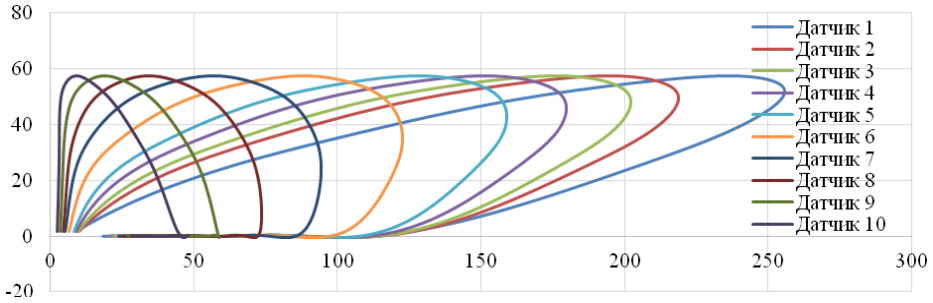
a



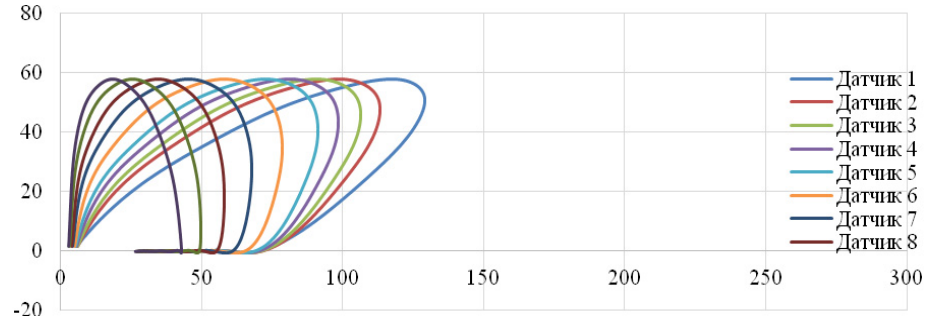
b

Рис. 2. Экспериментальные петли динамического гистерезиса, зарегистрированные на участках автомобильной дороги с неукрепленным (*a*) и укрепленным (*b*) основанием

Fig. 2. Experimental dynamic hysteresis loops recorded in the areas road with unreinforced and reinforced base



a



b

Рис. 3. Расчетные петли динамического гистерезиса, зарегистрированные на участках автомобильной дороги с неукрепленным (*a*) и укрепленным (*b*) основанием

Fig. 3. Calculated dynamic hysteresis loops recorded in sections of the automobile roads with unfortified (*a*) and fortified (*b*) base

Таблица 3

Экспериментальные и расчетные площади петель гистерезиса, и величина отклонений между ними

Table 3

Experimental and calculated areas of hysteresis loops, and the magnitude of deviations between them

Датчик	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
Конструкция 1 – диссипация энергии по датчику, Дж/м^3										
Эксперимент	7,28	6,78	6,60	6,09	5,60	4,70	3,95	3,23	2,59	2,02
Расчетные значения	4,88	4,87	4,83	4,73	4,61	4,28	3,85	3,37	2,86	2,35
Отклонение	-0,49	-0,39	-0,37	-0,29	-0,21	-0,10	-0,02	0,04	0,09	0,14
Конструкция 2										
Эксперимент	4,40	4,05	3,95	3,79	3,62	3,32	2,98	2,58	2,19	1,85
Расчетные значения	3,76	3,74	3,72	3,67	3,61	3,44	3,22	2,95	2,65	2,32
Отклонение	-0,17	-0,08	-0,06	-0,03	0,00	0,04	0,08	0,12	0,17	0,20

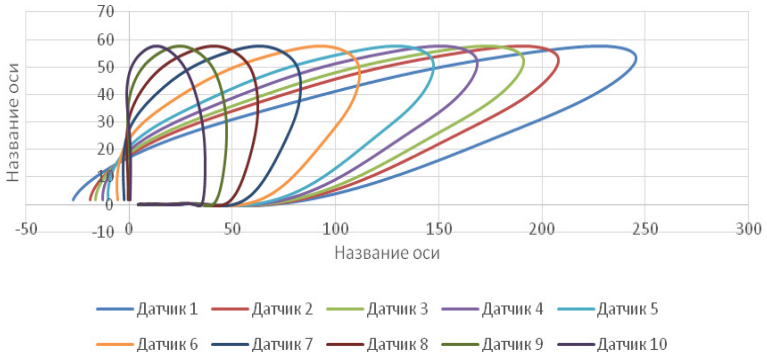
Таблица 4

Результаты сопоставления итоговых площадей расчетных и экспериментальных петель гистерезиса

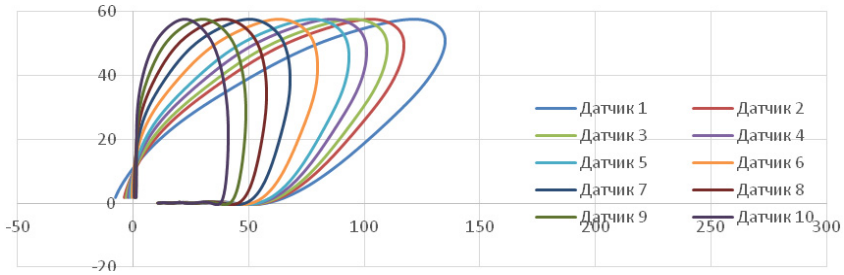
Table 4

Results of Comparison of the Total Areas of Calculated and Experimental Hysteresis Loops

Датчик	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
Конструкция 2 – диссипация энергии по датчику, Дж/м^3										
Эксперимент	7,28	6,78	6,60	6,09	5,60	4,70	3,95	3,23	2,59	2,02
Расчетные значения	6,88	6,27	5,99	5,61	5,24	4,54	3,90	3,30	2,74	2,25
Отклонение	-0,06	-0,08	-0,10	-0,09	-0,07	-0,03	-0,01	0,02	0,05	0,10
Конструкция 2 – диссипация энергии по датчику, Дж/м^3										
Эксперимент	4,40	4,05	3,95	3,79	3,62	3,32	2,98	2,58	2,19	1,85
Расчетные значения	4,12	3,79	3,66	3,51	3,37	3,10	2,84	2,57	2,29	2,01
Отклонение	-0,07	-0,07	-0,08	-0,08	-0,07	-0,07	-0,05	0,00	0,04	0,08



a



b

Рис. 4. Расчетные петли динамического гистерезиса, зарегистрированные на участках автомобильной дороги с неукрепленным (*a*) и укрепленным (*b*) основанием, откорректированные с учетом диссипации энергии в дорожной конструкции

Fig. 4. Calculated dynamic hysteresis loops recorded on sections of the road with unreinforced (*a*) and reinforced (*b*) bases, corrected for energy dissipation in the road structure

Таблица 5

Итоговые результаты расчета модулей упругости и тангенсов углов потерь
с учетом корректировки расчетных чаш прогибов и петель гистерезиса

Table 5

The final results of the calculation of the elastic moduli and loss tangents,
taking into account the correction of the calculated deflection bowls and hysteresis loops

Конструкция дорожной одежды с неукрепленным основанием	Модуль упругости, МПа	Тангенс угла потерь	Конструкция дорожной одежды с укрепленным основанием	Модуль упругости, МПа	Тангенс угла потерь
Асфальтобетон	3170	0.86	Асфальтобетон	7400	0.91
Щебеночно-песчаная смесь	80	0.73	Щебеночно-песчаная смесь, укрепленная цементом	5000	0.80
Грунт – глина	170	0.75	Щебеночно-песчаная смесь	600	0.80
			Грунт	160	0.82

В ходе корректировки было установлено, что значения модулей упругости слоев дорожной одежды и тангенсов углов потерь в них оказывают комплексное влияние на площади динамических петель гистерезиса и характера затухания энергии на удалении от точки приложения нагрузки. При этом в наибольшей степени на площадь динамических петель гистерезиса влияние оказывает модуль упругости подстилающего полупространства, не ограниченного по толщине, а уменьшение рассеиваемой энергии на удалении от точки приложения нагрузки связано, в первую очередь, с тангенсами углов потерь энергии в слоях полупространства, принимающих значения, указанные в табл. 5. При этом, очевидно, дискуссионным является представление о том, что данные значения тангенсов углов потерь характеризуют исключительно вязкость материала, так как полученные значения достаточно велики, чтобы характеризовать мнимую составляющую комплексного модуля упругости материала. Основным объяснением получаемых значений служит то, что они учитывают закономерности рассеяния энергии на границах контактирующих слоев дорожной одежды, а также возможные аномалии и расслоения в рассчитываемых конструкциях. Как видно из представленных результатов корректировки, расчетная картина затухания энергии на удалении от точки приложения нагрузки практически полностью соответствует экспериментальной, не отклоняясь ни по одному из датчиков на величину более 10 %.

Заключение

Представлены результаты совершенствования метода неразрушающего контроля состояния конструктивных слоев нежестких дорожных одежд, основанного на решении «обратной» задачи, в части учета их вязкоупругого поведения, характеризующегося тангенсами углов потерь энергии.

Впервые представлен алгоритм решения обратной задачи, объединяющий корректировку как упругих постоянных конструктивных слоев (модулей упругости) по замеренным в полевых условиях вертикальным перемещениям, так и характеристик вязкоупругости в виде петель гистерезиса на различном удалении от точки ударного нагружения. В рамках реализованных примеров достигнута точность корректировки чаш упругих прогибов, не превышающая 5 % отклонений между расчетными и экспериментальными величинами перемещений на поверхности исследуемой среды и 10 % между расчетными и экспериментальными величинами площадей петель гистерезиса.

В ходе корректировки было установлено, что значения модулей упругости слоев дорожной и тангенсов углов потерь в них оказывают комплексное влияние на площади динамических петель гистерезиса и характера затухания энергии на удалении от точки приложения нагрузки. При этом в наибольшей степени на площадь динамических петель гистерезиса влияние оказывает модуль упругости подстилающего полупространства, не ограниченного по толщине (что привело к увеличению модуля упругости подстилающего полупространства со 120 и 150 МПа для вариантов дорожной конструкции с укрепленным и неукрепленным основанием до 170 и 160 МПа соответственно), а уменьшение рассеиваемой энергии на удалении от точки приложения нагрузки связано, в первую очередь, с тангенсом угла потерь энергии в полупространстве. Полученные значения тангенсов углов потерь, очевидно, связаны с закономерностями рассеяния энергии на границах контактирующих слоев дорожной одежды, а также учитывают все возможные аномалии и расслоения в рассчитываемых конструкциях.

Библиографический список

1. Asphalt pavement design optimisation: A case study using viscoelastic continuum damage theory / L.D. Bueno [et al.] // International Journal of Pavement Engineering. – 2022. – Vol. 23, no. 4. – P. 1070–1082.

2. Shojaeifard M., Baghani M., Shahsavari H. Rutting investigation of asphalt pavement subjected to moving cyclic loads: An implicit viscoelastic–viscoplastic–viscodamage FE framework // International Journal of Pavement Engineering. – 2020. – Vol. 21, no. 11. – P. 1393–1407.

3. Gkyrtis K., Armeni A., Loizos A. A mechanistic perspective for airfield pavements evaluation focusing on the asphalt layers' behaviour // International Journal of Pavement Engineering. – 2021. – P. 1–14.

4. Determination of complex modulus gradients of flexible pavements using falling weight deflectometer and artificial intelligence / Y. Deng [et al.] // Materials and Structures. – 2020. – Vol. 53, no. 4. – P. 1–17.

5. Khan Z. H., Tarefder R.A., Hasan M.A. Field characterization of pavement materials using falling weight deflectometer and sensor data from an instrumented pavement section // Transportation Research Record. – 2020. – Vol. 2674, no. 4. – P. 205–221.

6. Prediction of critical responses in full-depth asphalt pavements using the falling weight deflectometer deflection basin parameters / B. Park [et al.] // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 318. – P. 126019.

7. White G. Use of falling weight deflectometer for airport pavements // Civil Infrastructures Confronting Severe Weathers and Climate Changes Conference. – Springer, Cham, 2018. – P. 119–133.

8. Monitoring the evolution of the structural properties of warm recycled pavements with Falling Weight Deflectometer and laboratory tests / L.P. Ingrassia [et al.] // Road Materials and Pavement Design. – 2021. – Vol. 22, no. sup1. – P. S69–S82.

9. Bodin D., Jameson G. Strategy for an improved mechanistic-empirical flexible pavement treatment design. – 2021. – № AP-R650-21.

10. Characterizing Existing Asphalt Concrete Layer Damage for Mechanistic Pavement Rehabilitation Design / D. Ayyala [et al.] // United States. Federal Highway Administration, 2018. – № FHWA-HRT-17-059.

11. Prediction of back-calculated layer moduli using cuckoo search algorithm for pavement asset management at a network level / V. Chundi [et al.] // Innovative Infrastructure Solutions. – 2021. – Vol. 6, no. 3. – P. 1–15.

12. Bazi G., Assi T.B. Asphalt concrete master curve using dynamic backcalculation // International Journal of Pavement Engineering. – 2022. – Vol. 23, no. 1. – P. 95–106.

13. Öcal A., Pekcan O. Cuckoo Search Based Backcalculation Algorithm for Estimating Layer Properties of Full-Depth Flexible Pavements // Applications of cuckoo search algorithm and its variants. – Springer, Singapore, 2021. – P. 229–252.

14. Raposo S., Rowe G. Falling Weight Deflectometer Tests Back-Analysis Using Levenberg-Marquartd Optimization // Airfield and Highway Pavements 2019: Innovation and Sustainability in Highway and Airfield Pavement Technology. – Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2019. – P. 313–321.

15. Back-calculation of elastic modulus of high liquid limit clay subgrades based on viscoelastic theory and multipopulation genetic algorithm / J. Zhang [et al.] // International Journal of Geomechanics. – 2020. – Vol. 20, no. 10. – P. 04020194.

16. Zhang X., Otto F., Oeser M. Pavement moduli backcalculation using artificial neural network and genetic algorithms // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 287. – P. 123026.

17. Elshamy M.M.M., Tiraturyan A.N. Using application of an artificial neural network system to backcalculate pavement elastic modulus // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2020. – No. 2. – P. 84–93.

18. Development of the non-destructive monitoring methods of the pavement conditions via artificial neural networks / M.M.M. Elshamy [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 1614, no. 1. – P. 012099.

19. Comparison of feed-forward, cascade-forward, and Elman algorithms models for determination of the elastic modulus of pavement layers / M.M.M. Elshamy [et al.] // 2021 4th International Conference on Geoinformatics and Data Analysis. – 2021. – P. 46–53.

20. Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Lyapin A.A. An energy method for determining the residual resource of nonrigid road pavements at the stage of operation // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2020. – Vol. 56, no. 10. – P. 864–872.

21. Energy analysis for evaluating durability of porous asphalt mixture / W. Huang [et al.] // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 326. – P. 126819.

22. Viscoelastic fatigue damage properties of asphalt mixture with different aging degrees / S. Lv [et al.] // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2018. – Vol. 22, no. 6. – P. 2073–2081.

23. Liu H., Luo R. Development of failure criterion and fatigue model to characterize the fatigue resistance of asphalt binders under controlled-stress time sweep tests // Materials and Structures. – 2020. – Vol. 53, no. 1. – P. 1–12.

24. Vorovich, I., Babeshko, V., Pryakhina, O. Dynamics of massive bodies and resonance phenomena in deformable media. – 1999.

25. Babeshko V.A. Dynamics of inhomogeneous linearly elastic media. The science. Ch. ed. Phys.-Math. lit. – 1989.

26. Deblois K., Bilodeau J.P., Dore G. Use of falling weight deflectometer time history data for the analysis of seasonal variation in pavement response // Canadian Journal of Civil Engineering. – 2010. – Vol. 37, no. 9. – P. 1224–1231.

27. Structural assessment of asphalt pavement condition using backcalculated modulus and field data / H. Wang [et al.] // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 211. – P. 943–951.

28. Uglova E.V, Tiraturyan A.N., Lyapin A.A. Integrated approach to studying characteristics of dynamic deformation on flexible pavement surface using nondestructive testing // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2016. – No. 0(2). – P. 111–130.

29. Model for determining the elastic moduli of road pavement layers / A.N. Tiraturyan, E.V. Uglova, D.A. Nikolenko, M.A. Nikolenko // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – Vol. 103(3). Article No. 10308. DOI: 10.34910/MCE.103.8

30. Iliopolov S.K., Seleznev M.G., Uglova E.V. Dynamics of road structures: monograph. – Rostov-on-Don: Publishing house of Rostov State University of Civil Engineering, 2002. – 258 p.

References

1. Asphalt pavement design optimisation: A case study using viscoelastic continuum damage theory / L.D. Bueno [et al.] // International Journal of Pavement Engineering. – 2022. – Vol. 23, no. 4. – P. 1070–1082.

2. Shojaeifard M., Baghani M., Shahsavari H. Rutting investigation of asphalt pavement subjected to moving cyclic loads: An implicit viscoelastic–viscoplastic–viscodamage FE framework // International Journal of Pavement Engineering. – 2020. – Vol. 21, no. 11. – P. 1393–1407.

3. Gkyrtis K., Armeni A., Loizos A. A mechanistic perspective for airfield pavements evaluation focusing on the asphalt layers' behaviour // International Journal of Pavement Engineering. – 2021. – P. 1–14.

4. Determination of complex modulus gradients of flexible pavements using falling weight deflectometer and artificial intelligence / Y. Deng [et al.] // Materials and Structures. – 2020. – Vol. 53, no. 4. – P. 1–17.

5. Khan Z. H., Tarefder R.A., Hasan M.A. Field characterization of pavement materials using falling weight deflectometer and sensor data from an instrumented pavement section // Transportation Research Record. – 2020. – Vol. 2674, no. 4. – P. 205–221.

6. Prediction of critical responses in full-depth asphalt pavements using the falling weight deflectometer deflection basin parameters / B. Park [et al.] // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 318. – P. 126019.

7. White G. Use of falling weight deflectometer for airport pavements // Civil Infrastructures Confronting Severe Weathers and Climate Changes Conference. – Springer, Cham, 2018. – P. 119–133.

8. Monitoring the evolution of the structural properties of warm recycled pavements with Falling Weight Deflectometer and laboratory tests / L.P. Ingrassia [et al.] // Road Materials and Pavement Design. – 2021. – Vol. 22, no. sup1. – P. S69–S82.

9. Bodin D., Jameson G. Strategy for an improved mechanistic-empirical flexible pavement treatment design. – 2021. – № AP-R650-21.

10. Characterizing Existing Asphalt Concrete Layer Damage for Mechanistic Pavement Rehabilitation Design / D. Ayyala [et al.] // United States. Federal Highway Administration, 2018. – № FHWA-HRT-17-059.

11. Prediction of back-calculated layer moduli using cuckoo search algorithm for pavement asset management at a network level / V. Chundi [et al.] // Innovative Infrastructure Solutions. – 2021. – Vol. 6, no. 3. – P. 1–15.

12. Bazi G., Assi T.B. Asphalt concrete master curve using dynamic backcalculation // International Journal of Pavement Engineering. – 2022. – Vol. 23, no. 1. – P. 95–106.

13. Öcal A., Pekcan O. Cuckoo Search Based Back-calculation Algorithm for Estimating Layer Properties of Full-Depth Flexible Pavements // Applications of cuckoo search algorithm and its variants. – Springer, Singapore, 2021. – P. 229–252.

14. Raposo S., Rowe G. Falling Weight Deflectometer Tests Back-Analysis Using Levenberg-Marquartd Optimization // Airfield and Highway Pavements 2019: Innovation and Sustainability in Highway and Airfield Pavement Technology. – Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2019. – P. 313–321.

15. Back-calculation of elastic modulus of high liquid limit clay subgrades based on viscoelastic theory and multipopulation genetic algorithm / J. Zhang [et al.] // International Journal of Geomechanics. – 2020. – Vol. 20, no. 10. – P. 04020194.

16. Zhang X., Otto F., Oeser M. Pavement moduli back-calculation using artificial neural network and genetic algorithms // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 287. – P. 123026.

17. Elshamy M.M.M., Tiraturyan A.N. Using application of an artificial neural network system to backcalculate pavement elastic modulus // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2020. – No. 2. – P. 84–93.

18. Development of the non-destructive monitoring methods of the pavement conditions via artificial neural networks / M.M.M. Elshamy [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 1614, no. 1. – P. 012099.

19. Comparison of feed-forward, cascade-forward, and Elman algorithms models for determination of the elastic modulus of pavement layers / M.M.M. Elshamy [et al.] // 2021 4th International Conference on Geoinformatics and Data Analysis. – 2021. – P. 46–53.

20. Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Lyapin A.A. An energy method for determining the residual resource of nonrigid road pavements at the stage of operation // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2020. – Vol. 56, no. 10. – P. 864–872.

21. Energy analysis for evaluating durability of porous asphalt mixture / W. Huang [et al.] // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 326. – P. 126819.

22. Viscoelastic fatigue damage properties of asphalt mixture with different aging degrees / S. Lv [et al.] // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2018. – Vol. 22, no. 6. – P. 2073–2081.

23. Liu H., Luo R. Development of failure criterion and fatigue model to characterize the fatigue resistance of asphalt binders under controlled-stress time sweep tests // Materials and Structures. – 2020. – Vol. 53, no. 1. – P. 1–12.

24. Vorovich, I., Babeshko, V., Pryakhina, O. Dynamics of massive bodies and resonance phenomena in deformable media. – 1999.

25. Babeshko V.A. Dynamics of inhomogeneous linearly elastic media. The science. Ch. ed. Phys.-Math. lit. – 1989.

26. Deblois K., Bilodeau J.P., Dore G. Use of falling weight deflectometer time history data for the analysis of seasonal variation in pavement response // Canadian Journal of Civil Engineering. – 2010. – Vol. 37, no. 9. – P. 1224–1231.

27. Structural assessment of asphalt pavement condition using backcalculated modulus and field data / H. Wang [et al.] // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 211. – P. 943–951.

28. Uglova E.V, Tiraturyan A.N., Lyapin A.A. Integrated approach to studying characteristics of dynamic deformation on flexible pavement surface using nondestructive testing // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2016. – No. 0(2). – P. 111–130.

29. Model for determining the elastic moduli of road pavement layers / A.N. Tiraturyan, E.V. Uglova, D.A. Nikolenko, M.A. Nikolenko // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – Vol. 103(3). Article No. 10308. DOI: 10.34910/MCE.103.8

30. Iliopolov S.K., Seleznev M.G., Uglova E.V. Dynamics of road structures: monograph. – Rostov-on-Don: Publishing house of Rostov State University of Civil Engineering, 2002. – 258 p.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01259, https://rscf.ru/project/22-29-01259/.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Financing. The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-29-01259, https://rscf.ru/project/22-29-01259/.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

The contribution of the authors is equivalent.