

УДК 625.7/.8

DOI: 10.46698/VNC.2024.52.44.011

Оригинальная статья

Энергия деформирования в слоистой среде при ударном нагружении (на примере автомобильных дорог)

А.Н. Тиратурян^{ID}, В.В. Акулов^{ID}

Донской государственный технический университет, Россия, 344000,
г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, e-mail: tiraturjan@list.ru

Статья поступила: 27.09.2024, доработана: 28.11.2024, принята к публикации: 29.11.2024

Резюме: Актуальность работы. Слоистые среды – одни из наиболее часто встречающихся объектов в инженерно-строительной деятельности человека. С одной стороны они представляют собой грунтово-геологические массивы, а с другой, например, взаимодействующие с ними дорожные одежды автомобильных дорог. Исследование напряженно-деформированного состояния дорожных одежд автомобильных дорог служит основой для решения многих инженерных задач, и в последние годы осуществляется, как правило, с применением геофизических методов. Выработка эффективных критериев анализа состояния дорожных одежд на основе геофизических подходов, опирающихся на анализ диссипации энергии динамического деформирования, может в значительной степени послужить повышению их долговечности и надежности в течение жизненного цикла. **Цель работы.** Исследование процессов диссипации энергии деформирования в слоистых средах на примере дорожных одежд автомобильных дорог и установление качественных взаимосвязей между жесткостью отдельных слоев и диссипацией энергии деформирования в них. **Методы.** В рамках исследования выполнялись экспериментальные исследования диссипации энергии деформирования на поверхности дорожной одежды, и отдельных ее слоев по мере строительства. В качестве опытного участка был выбран строящийся участок автомобильной дороги I категории на Юге России. Для экспериментального анализа использовалась установка динамического нагружения с падающим грузом FWD PRIMAX 1500, позволяющая осуществлять регистрацию динамических петель гистерезиса как на поверхности отдельных слоев дорожной одежды, так и на поверхности автомобильной дороги. **Результаты.** Впервые рассчитаны количественные значения уровней диссипации энергии деформирования для дорожной одежды автомобильной дороги, и установлена их связь с жесткостными характеристиками конструктивных слоев. Установлено, что верхние тонкие слои покрытий дорожных одежд, обладающие большей вязкостью в сравнении с остальными слоями, служат «демпфером», поглощающим и рассеивающим энергию деформирования, позволяющим предохранять нижние слои от накопления деформаций и микроразрушений.

Ключевые слова: слоистые среды, напряженно-деформированное состояние, дорожная одежда, диссипация энергии, динамическое нагружение.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00110, <https://rscf.ru/project/24-29-00110/>.

Для цитирования: Тиратурян А.Н., Акулов В.В. Энергия деформирования в слоистой среде при ударном нагружении (на примере автомобильных дорог). *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(4): 128-141. DOI: 10.46698/VNC.2024.52.44.011

DOI: 10.46698/VNC.2024.52.44.011

Original paper

Deformation energy in a layered half-space under impact loading (on the example of highways)

A.N. Tiraturyan^{ID}, V.V. Akulov^{ID}

Don State Technical University, 1 Gagarin Ave., Rostov-on-Don 344000,
Russian Federation, e-mail: tiraturjan@list.ru

Received: 27.09.2024, revised: 28.11.2024, accepted: 29.11.2024

Abstract: Relevance. Layered half-space are among the most frequently encountered objects in human engineering and construction activities. On the one hand they represent soil-geological massifs, and on the other hand, for example, roadways interacting with them. The study of stress-strain state of highway pavements serves as a basis for solving many engineering problems, and in recent years is carried out as a rule with the use of geophysical methods. The development of effective criteria for analyzing the state of road pavements on the basis of geophysical approaches, based on the analysis of dissipation of dynamic deformation energy, can significantly serve to increase their durability and reliability during the life cycle. **Aim.** To study the processes of deformation energy dissipation in layered half-space on the example of road pavements of highways and to establish qualitative relationships between the stiffness of individual layers and the dissipation of deformation energy in them. **Methods.** Experimental investigations of the dissipation of deformation energy on the surface of the road pavement and its separate layers during construction were carried out within the framework of the research. For the experimental analysis we used a dynamic loading unit with a falling load FWD PRIMAX 1500, which allows to register dynamic hysteresis loops both on the surface of separate layers of pavement and on the road surface. **Results.** For the first time quantitative values of the levels of dissipation of deformation energy for the A-135 highway pavement have been calculated and their relationship with the stiffness characteristics of structural layers has been established. The assumption is made, confirmed by the results of experimental measurements, that the upper thin layers of pavements with higher viscosity compared to other layers serve as a “dampener” absorbing and dissipating the deformation energy, allowing to protect the lower layers from the accumulation of deformation and micro-destruction.

Keywords: lyered half-space, stress-strain state, road pavement, energy dissipation, dynamic loading.

Acknowledgments: The research was supported by Russian Science Foundation grant No. 24-29-00110, <https://rscf.ru/project/24-29-00110/>.

For citation: Tiraturyan A.N., Akulov V.V. Deformation energy in a layered half-space under impact loading (on the example of highways). *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2024. 14(4): 128-141. DOI: 10.46698/VNC.2024.52.44.011

Введение

Дорожные одежды автомобильных дорог представляют собой слоистые среды, взаимодействующие с грунтовым основанием и контактирующие с движущимся по их поверхности транспортным потоком. Фактически долговечность дорожных одежд определяет долговечность автомобильной дороги, и своевременное выявление проблем, связанных с внутренним или внешним дефектообразованием, может позволить значительно продлить их срок службы.

Поскольку работа дорожных одежд автомобильных дорог в течение года осуществляется преимущественно в условиях динамического нагружения, их деформирование может рассматриваться преимущественно с точки зрения геофизических методов. В работах [Бабешко и др., 1989, 2024; Ворович и др., 1999; Ляпин и др., 2008; Разин, Собисевич, 2012] были заложены основы расчетного аппарата для анализа подобных конструкций, а в последующих исследованиях [Илиополов и др., 2002; Beskopylny et al., 2017] данный расчетный аппарат был эффективно применен при решении задач дорожной отрасли.

В основе данных подходов лежит построение аналитического решения уравнения движения в форме уравнения Ламе:

$$(\lambda + 2\mu)\text{grad}(\text{div}\mathbf{u}) - \mu\text{rotrot}\mathbf{u} + \mathbf{F} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2}; \quad (1)$$

где:

λ, μ – коэффициенты Ламе,

$\mathbf{u}$ – вектор перемещений,

ρ – плотность среды.

В работе [Ляпин и др., 2008], были подробно рассмотрены способы построения решений для случая стационарных колебаний. В работе [Волкова и др., 2011] с применением метода дискретного гармонического анализа были получены соответствующие решения данного уравнения для случая нестационарного нагружения, реализуемые при решении задач восстановления механических параметров конструктивных слоев рассматриваемых сред, необходимых для проектирования, их восстановления и усиления.

Вместе с тем уравнение (1) с использованием свойств преобразования Фурье может учитывать, также и вязкость, характеризуемую введением тангенсов углов потерь продольных и поперечных волн в исследуемой среде.

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

где ∇ – набла-оператор;

$\theta_{j1}^2 = \omega^2 / V_{Pj}^2$, $\theta_{j2}^2 = \omega^2 / V_{Sj}^2$, – 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.

Учет вязкости в этом случае позволяет помимо традиционных определяемых в существующих методах исследования дискретных характеристик на поверхности дорожных одежд, таких как чаша прогиба (рис. 1), анализировать непрерывные характеристики деформирования, в виде динамических петель гистерезиса [Тиратурян, 2024; Тиратурян, 2023].

В мировой практике также уделяется большое внимание исследованиям, касающимся динамики деформирования слоистых сред на примере дорожных одежд. В целом данные методики могут быть разделены на «традиционные» подходы к исследованиям характеристик деформирования, регистрируемых на поверхности дорожных одежд, и геофизические методы изучения амплитудно-частотных и амплитудно-временных характеристик скоростей и ускорений, а также методики анализа, базирующиеся на построении профилей скоростей продольных волн и волн сдвига в структуре дорожных одежд.

К таким методам можно отнести метод спектрального анализа поверхностных волн (SASW) [Qiao et al., 2023; Goel, 2024; Gohil et al., 2024; Nazarian et al., 1995] и метод многоканального анализа поверхностных волн (MASW) [Gohil et al., 2023; Madun et al., 2020]. Оба этих метода базируются на регистрации поверхностных волн Рэлея, так как этот тип волн несет в себе информацию о соотношении фазовых скоростей и частот колебаний, которые позволяют построить дисперсионную кривую, и профили сдвиговых волн по глубине исследуемого массива. Затем после построения экспериментального профиля скоростей волн, осуществляется решение обратной задачи, которая позволяет подобрать соответствующие жесткостные и геометрические характеристики исследуемого массива. Нужно отметить, что метод SASW достаточно активно применяется при оценке эксплуатационного состояния автомобильных дорог [Wu et al., 2022; Nazarian et al., 1995].

Особого внимания при оценке свойств слоистых сред на примере дорожных одежд заслуживают установки ударного нагружения FWD [Pandya et al., 2024; Makwana, 2023; Aziz, Taher, 2021]. Мировым стандартом в области оценки состояния дорожных одежд в целом и отдельных их слоев является общепризнанный подход к определению модулей упругости слоев дорожных одежд по зарегистрированной на поверхности покрытия автомобильной дороги чаше прогибов. Идеология этого метода в целом близка идее метода SASW, с поправкой на то, что вместо регистрации скоростей поверхностных волн в местах установки датчиков, происходит регистрация скоростей вертикальных колебаний, пересчитываемых затем в вертикальные перемещения. После чего путем решения «обратной» задачи, восстанавливаются жесткостные характеристики слоев дорожной одежды, обеспечивающие расчетную чашу прогибов, аналогичную измеренной в полевых условиях [Wang et al., 2020].

В последних генерациях установок ударного нагружения FWD в дополнение к возможности регистрации чаш прогибов, появилась возможность регистрации динамических петель гистерезиса по каждому из датчиков [Ziyadi et al., 2023; Yin, 2012]. Учитывая, что площадь петли гистерезиса напрямую характеризует работу деформирования, или другими словами величину диссипации энергии, необратимо затрачиваемую при деформировании, анализ этого показателя может значительно расширить информативность существующих методов неразрушающего контроля состояния дорожных одежд.

При этом до текущего момента проведено крайне мало испытаний, направленных на установление количественных значений энергии диссипации в слоях дорожных одежд на реально строящихся объектах. Отсутствуют также и экспериментальные результаты позволяющие оценить соотношение между жесткостными характеристиками слоев дорожных одежд и величиной энергии динамического деформирования, рассеиваемой в них. Именно поэтому цель данной работы заключается в экспериментальном исследовании процессов диссипации энергии деформирования в слоистых средах на примере автомобильных дорог и установлении количественных и качественных характеристик диссипации энергии, зарегистрированных на тестовом участке автомобильной дороги.

Методы исследования

В качестве тестовой конструкции была принята конструкция дорожной одежды, устроенная на автомобильной дороге А-135 в г. Ростов-на-Дону (рис. 1). Данная конструкция устраивалась полностью новой, и состоит из слоев, проектные значения механических характеристик которых представлены в таблице 1.

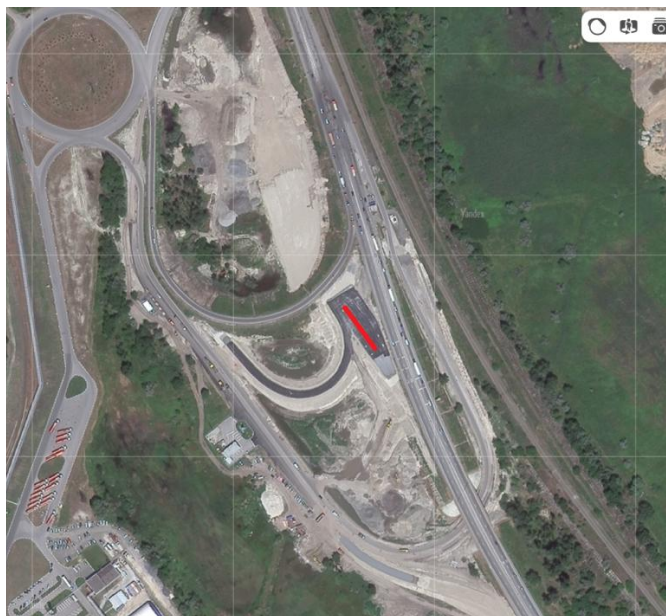


Рис. 1. План участка мониторинга (красной линией указан участок проведения мониторинга) /
Fig. 1. Plan of the monitoring site Monitoring site plan (the red line indicates the monitoring site)

Таблица 1 / Table 1

**Механические параметры конструктивных слоев дорожной одежды
на участке мониторинга /
Mechanical parameters of structural pavement layers at the monitoring site**

Материалы конструктивных слоев / Materials of structural layers	Проектные данные / Design data		
	Проектная толщина, см / Design thickness, cm	Проектный модуль упругости на поверхности конструктивных слоев (для асфальтобетона при 10°C), МПа / Design modulus of Young on the surface of structural layers (for asphalt concrete at 10°C), MPa	Проектный модуль упругости на поверхности конструктивных слоев, при 10° расчет ПНСТ 265, МПа / Design equivalent modulus of Young on the surface of structural layers, at 10° calculated PNST 265, MPa
Верхний слой покрытия – ШМА 16 по ПНСТ 183-2019 на ПБВ 60 по ГОСТ 52056-2003 / The surface layer of the pavement is SMA 16 according to PNST 183-2019 on PBV 60 according to GOST 52056-2003	5	4600	1067.64

Нижний слой покрытия – А 32 НТ по ПНСТ 184-2019 на БНД 50/70 по ГОСТ 33133-2014 / Lower pavement layer – A 32 NT according to PNST 184-2019 on BND 50/70 according to GOST 33133-2014	8	4500	913.27
Верхний слой основания – А 32 ОТ по ПНСТ 184-2019 на БНД 50/70 по ГОСТ 33133-2014 / Top base layer – A 32 OT according to PNST 184-2019 on BND 50/70 according to GOST 33133-2014	12	2900	667
Укрепленный слой основания из органоминеральной смеси ХО 32 ЭМ / Stabilized base layer made of organomineral mixture HO 32 EM	22	1000	446.54
Нижний слой основания – Щебень М800 фр. 31,5-63 мм, ГОСТ 32703-2014 / The bottom layer of the base (granular base) – Crushed stone М800 crushed stone of 31.5-63 mm, GOST 32703-2014	36	450	227.86
Дополнительный слой основания – Песок средней крупности с коэфф. фильтр. более 1 м/сут., ГОСТ 8736-93 / Subbase layer — Medium coarse sand with a filter coefficient of more than 1 m/day, GOST 8736-93	20	120	75.59
Грунт – суглинок / Soil – loam		43	43
Общая толщина / Total thickness	103		

Контроль фактических значений механических параметров слоев дорожной конструкции и диссипации энергии деформирования осуществлялся с использованием датской установки динамического нагружения FWD PRIMAX 1500 (рис. 2). Данная установка представляет собой прицеп со смонтированными на нем механизмом ударного нагружения и измерительной балкой, регистрирующей вертикальную компоненту скорости перемещений, впоследствии пересчитываемую в абсолютные значения вертикальных перемещений. Отличием данной установки является возможность практически непрерывной, с шагом дискретизации 0.002 с, записи амплитудно-временной характеристики перемещений на поверхности покрытия и амплитудно-временной характеристики импульса ударного нагружения (рис. 3).

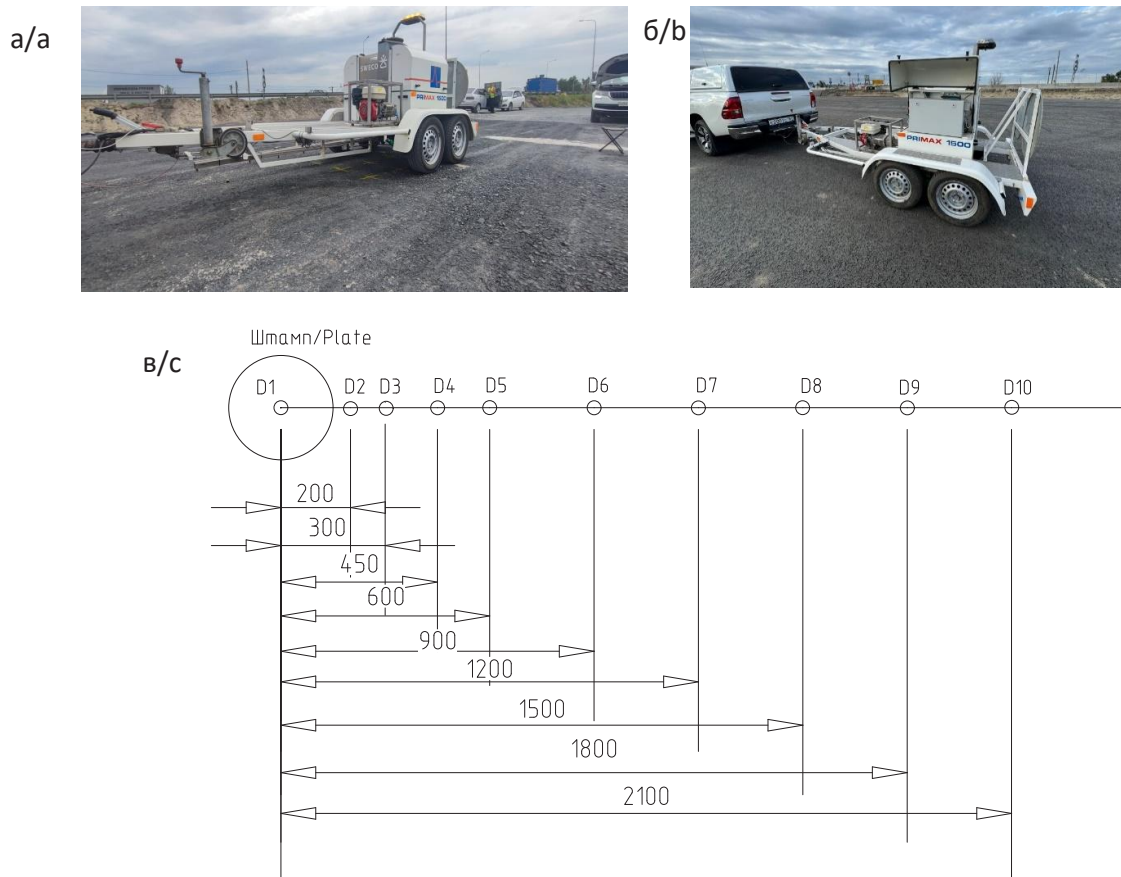


Рис. 2. Установка ударного нагружения для регистрации вертикальных перемещений на слое из органоминеральной смеси (а) и слое асфальтобетонного покрытия (б); схема размещения датчиков-измерителей прогиба, расстояния даны в мм (в) /

Fig. 2. Impact loading rig for recording vertical displacements on a layer of organomineral mixture (a) and asphalt surface layer (b); sensor layout deflection gauges, distances are given in mm (c)

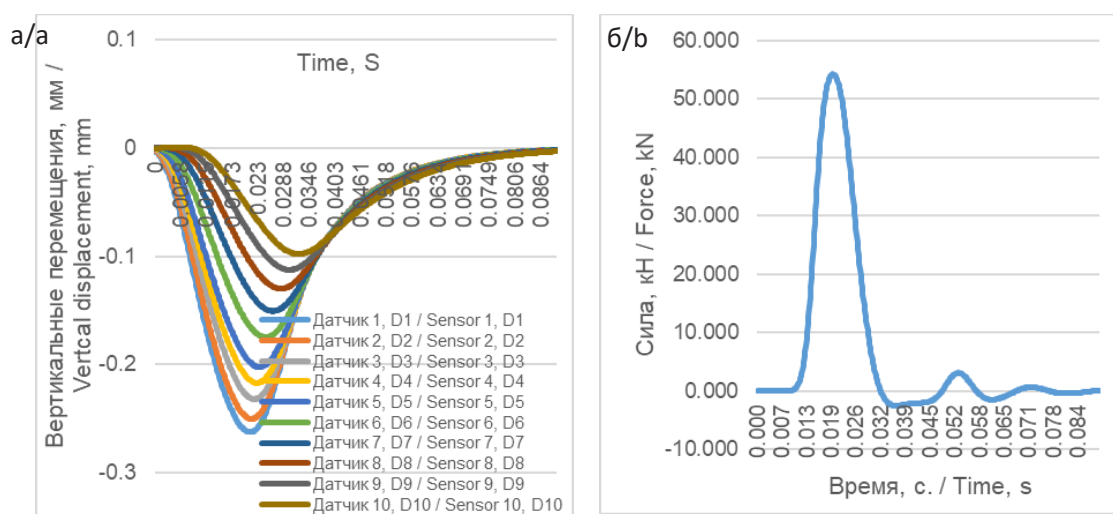


Рис. 3. Примеры амплитудно-временной характеристики перемещений (а) и амплитудно-временной характеристики импульса ударного нагружения (б), зарегистрированные установкой FWD /

Fig. 3. Examples of the amplitude-time displacement characteristic and amplitude-time characteristic of impulse load, recorded by the FWD

Измерения с использованием данной установки осуществлялись на поверхности каждого слоя дорожной одежды по мере ее возведения, начиная с несвязного слоя из фракционированного щебня, заканчивая верхним асфальтобетонным слоем покрытия ЦМА-16. Учитывая влияние температуры асфальтобетона на его механические свойства периоды испытаний подбирались таким образом, чтобы температура на момент проведения всех работ на поверхности асфальтобетонных слоев составляла 13–15 °С.

При обработке результатов измерений удельная диссипация энергии рассчитывалась как:

$$W_{def} = \int_0^t F(t) u(t) dt$$

W_{def} – удельная диссипация энергии, Дж/м³,

$F(t)$ – временная характеристика импульса ударного нагружения от времени,

$u(t)$ – амплитудно-временная характеристика перемещений на поверхности покрытия.

Результаты работы и обсуждение

Ниже представлены результаты определения удельной диссипации энергии за цикл ударного нагружения установкой FWD на щебне, в укрепленном слое основания из органоминеральной смеси, и на поверхности верхнего слоя основания, нижнего слоя покрытия и верхнего слоя покрытия (рис. 4).

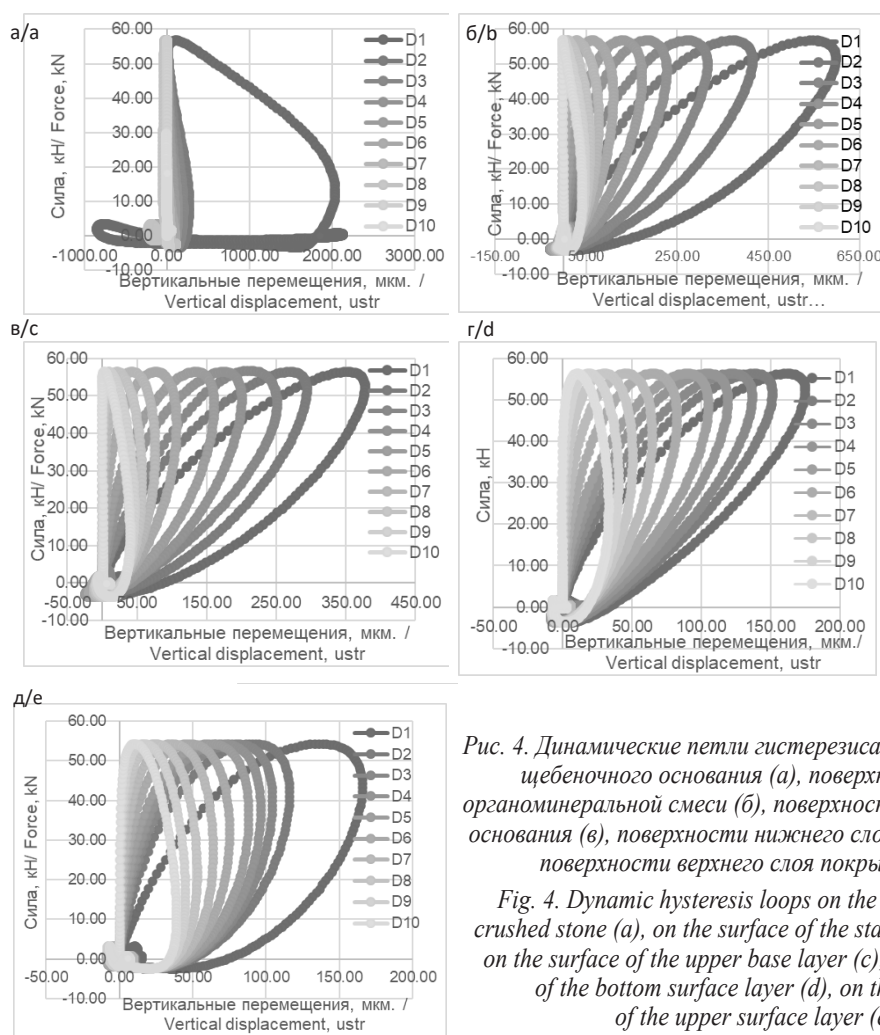


Рис. 4. Динамические петли гистерезиса на поверхности щебеночного основания (а), поверхности слоя органоминеральной смеси (б), поверхности верхнего слоя основания (в), поверхности нижнего слоя покрытия (г), поверхности верхнего слоя покрытия (д) /

Fig. 4. Dynamic hysteresis loops on the surface of the crushed stone (a), on the surface of the stabilized base (b), on the surface of the upper base layer (c), on the surface of the bottom surface layer (d), on the surface of the upper surface layer (e)

Как видно из представленных графиков по мере увеличения капитальности дорожной одежды, т.е. с увеличением количества слоев, уменьшается площадь динамических петель гистерезиса, а следовательно, и фактическое значение удельной диссипации энергии. При этом характерную форму имеют динамические петли гистерезиса, зарегистрированные на поверхности щебеночного слоя. Наибольшее отличие траекторий нагружения наблюдается на первом датчике, при этом на рисунке 4а присутствует характерный «хвост» петли гистерезиса, свидетельствующий о накоплении пластических деформаций, после воздействия динамической нагрузки установки ударного нагружения FWD. На остальных датчиках D2–D9 видна картина резкого затухания энергии, обусловленная выраженными процессами трения между частицами в дискретном слое. Остальные слои являются монолитными, в том числе, это характерно и для укрепленного слоя основания из органоминеральной смеси, что соответственно приводит к значительно более низким значениям величины диссипации энергии деформации в них на датчике D1, и некоторому увеличению рассеянной энергии в области датчиков D2–D10.

В графическом виде фактические результаты определения диссипации энергии приведены на рисунке 5.

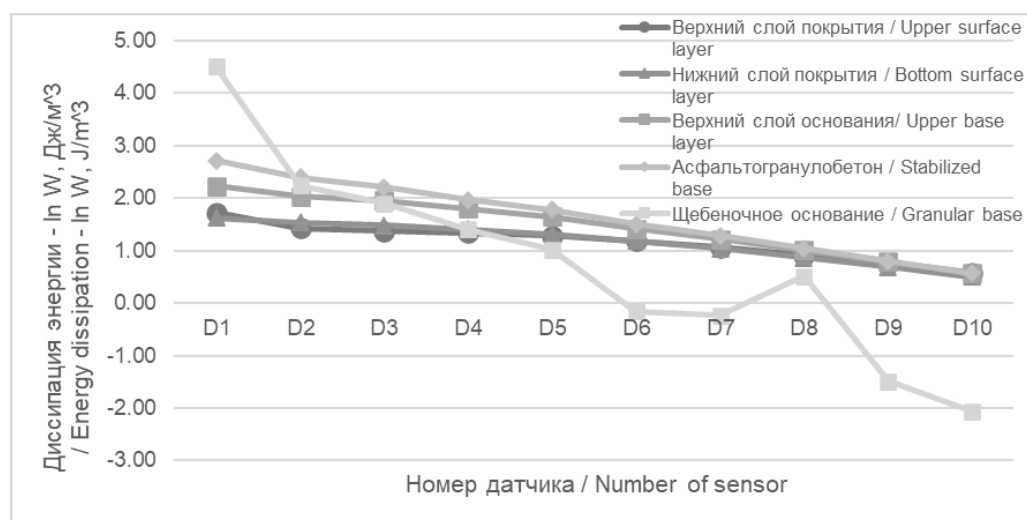


Рис. 5. Изменение величины удельной диссипации энергии по мере увеличения капитальности дорожной одежды /

Fig. 5. Variation of specific energy dissipation as the capitalization of the pavement increases

Данные на рисунке 5 приводятся в логарифмическом масштабе. Особое внимание следует обратить на величину рассеянной энергии, рассчитанной по петле гистерезиса по датчику D8. В этой точке кривая изменения энергии теряет монотонность из-за дискретности слоя щебеночного основания. Для всех остальных слоев, являющихся монолитными, кривые изменения величины диссипации энергии являются монотонными.

На основе полученных фактических значений, по первому датчику – D1, находящемуся непосредственно в точке нагружения, был произведен расчет энергии, рассеянной каждым слоем в структуре дорожной одежды (табл. 2)

Таблица 2 / Table 2

Фактические значения диссипации энергии деформирования и фактические значения модулей упругости слоев дорожной одежды / Actual values of dissipation of deformation energy and actual values of elastic moduli of pavement layers

Наименование слоя	Диссипация энергии на поверхности слоя, Дж/м ³ / Energy dissipated on surface layer, J/m ³	Изменение энергии деформирования по мере наращивания капитальности Дж/м ³ / Change in deformation energy as capitalization increases, J/m ³	Общий модуль упругости на поверхности слоя, МПа / Equivalent modulus of Young on surface layer, MPa	Модуль упругости слоя, МПа / Modulus of Young of layer, MPa.
Верхний слой покрытия – ЩМА 16 по ПНСТ 183-2019 на ПБВ 60 по ГОСТ 52056-2003 / The surface layer of the pavement is SMA 16 according to PNST 183-2019 on PBV 60 according to GOST 52056-2003	5.581	0.48	1120	6000
Нижний слой покрытия – А 32 НТ по ПНСТ 184-2019 на БНД 50/70 по ГОСТ 33133-2014 / Lower pavement layer – A 32 NT according to PNST 184-2019 on BND 50/70 according to GOST 33133-2014	5.097	-4.16	1053	13000
Верхний слой основания – А 32 ОТ по ПНСТ 184-2019 на БНД 50/70 по ГОСТ 33133-2014 / Top base layer – A 32 OT according to PNST 184-2019 on BND 50/70 according to GOST 33133-2014	9.259	-5.88	488	3000
Укрепленный слой основания из органоминеральной смеси ХО 32 ЭМ / Stabilized base layer made of organomineral mixture HO 32 EM	15.135	-75.02	308	2000
Нижний слой основания – Щебень М800 фр. 31,5-63 мм, ГОСТ 32703-2014 / The bottom layer of the base (granular base) – Crushed stone M800 crushed stone of 31.5-63 mm, GOST 32703-2014	90.15	-	87	-

Анализируя данную таблицу, можно отметить, что по мере наращивания капитальности дорожной одежды, путем устройства новых конструктивных слоев об-

ший модуль упругости на поверхности постоянно увеличивается, изменяясь при этом в зависимости от толщины вновь устраиваемого слоя. Фактическая величина диссипации энергии на поверхности каждого вновь устраиваемого слоя уменьшается, вплоть до устройства верхнего слоя покрытия из ЩМА, на поверхности которого диссипация энергии вновь увеличивается. Данный эффект может быть объяснен тем, что слой ЩМА в отличие от остальных слоев асфальтобетона отличается большим содержанием битумного вяжущего, и как следствие большим внутренним трением, возникающим при приложении на его поверхности нагрузки. Это позволяет сформулировать важный вывод – устройство тонкого слоя с большим содержанием вяжущего на поверхности дорожной одежды может служить своеобразным демпфером, поглощающим и рассеивающим энергию деформирования на поверхности, предохраняющим нижние слои от накопления деформаций и микроразрушений. При этом очень важно, что этот слой должен быть достаточно тонким, чтобы не стать источником накопления пластических деформаций в структуре дорожной одежды. Выработка рациональных параметров для подобных слоев требует большего накопления статистических данных, включающих различные виды щебеночно-мастичных асфальтобетонов, устроенных с применением различных вяжущих и добавок, а также широко распространяемые в последние годы слои поверхностных обработок и тонкие слои из литых эмульсионно-минеральных смесей.

Выводы

1. Впервые установлены количественные значения величины диссипации энергии на поверхности конструктивных слоев дорожных одежд автомобильных дорог и непосредственно в слоях дорожных одежд автомобильных дорог, позволяющие оценить степень ее изменения по мере наращивания капитальности дорожной одежды.

2. Отмечено, что по мере увеличения капитальности дорожной одежды общий модуль упругости на поверхности непрерывно возрастает, в то время как величина диссипации энергии убывает. Однако в случае применения слоев, содержащих большое количество вяжущего, т.е. обладающих большей внутренней вязкостью в сравнении со смежными слоями, величина диссипации энергии начинает возрастать, что обуславливается большими потерями на преодоление вязкого трения.

3. Установлено, что устройство тонкого слоя с большим содержанием, вяжущего на поверхности дорожной одежды, может служить своеобразным демпфером, поглощающим и рассеивающим энергию деформирования на поверхности, предохраняющим нижние слои от накопления деформаций и разрушений. Величина диссипации энергии деформирования в таком слое может являться индикатором его рассеивающей способности, и как следствие эффективности.

Литература

1. Бабешко В.А., Глушков Е.В., Зинченко Ж.Ф. Динамика неоднородных линейно-упругих сред. М.: Наука, 1989. – 344 с.
2. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М., Уафа С.Б., Лозовой В.В., Евдокимов В.С. О предвестнике землетрясения в сейсмоопасной горной территории // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 33–44. DOI: 10.46698/VNC.2024.21.47.003.
3. Волкова Е.А., Ляпин А.А., Селезнев М.Г., Углова Е.В. О решении обратных задач строительной механики на основе данных натурного эксперимента. // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2011. – № 2(626). – С. 65–71.

4. Ворович И.И., Бабешко В.А., Пряхина О.Д. Динамика массивных тел и резонансные явления в деформируемых средах. М.: Научный мир, 1999. – 246 с.
5. Илиополов С.К., Селезнёв М.Г., Углова Е.В. Динамика дорожных конструкций. Ростов-на-Дону: РГСУ, 2002 – 258 с.
6. Ляпин А.А., Селезнёв М.Г., Селезнёв Н.М. Динамическая контактная задача для трехслойного полупространства с цилиндрической полостью. // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2008. – № 4. – С. 70–75
7. Разин А.В., Собисевич А.Л. Геоакустика слоистых сред. М.: ИФЗ РАН, 2012. – 210 с.
8. Тиратурян А.Н. Обратный расчет модулей упругости элементов слоистых сред на основе анализа динамического деформирования (на примере автомобильных дорог). // Дефектоскопия. – 2024. – № 8. – С. 52–61. DOI: 10.31857/S0130308224080059.
9. Тиратурян А.Н. 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.
10. Aziz S.H.A., Taher M.N.M. Application of falling weight deflectometer (FWD) and synthetic fiber in the asphalt mixture: a review. // Recent Trends in Civil Engineering and Built Environment. – 2021. – Vol. 2. No. 1. – pp. 305–314.
11. Beskopylny A., Lyapin A., Andreev V. Layered structures mechanical properties assessment by dynamic tests. // In: Proceedings MATEC Web of Conferences. EDP Sciences. – 2017. – Vol. 117. – Art. No. 00018.
12. Goel A. Subsurface anomaly assessment in asphalt layers using Rayleigh waves dispersion characteristics: a test-pit study. // Nondestructive Testing and Evaluation. – 2024. – pp. 1–21.
13. Gohil R.R., Kumar J., Parthasarathy C.R. Pavement testing using nondestructive MASW approach. // In: Proceedings of the Geo-Congress 2023. – 2023. – pp. 163–172.
14. Gohil R.R., Samu V., Kumar J. Non-destructive evaluation of rigid pavements using surface wave tests. // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 442. – Art. No. 137651.
15. Madun A., Kamaruddin N.H.M., Remmani S.A. Numerical seismic approach for pavement investigation. // International Journal of Scientific and Technology Research. – 2020. – Vol. 9. Issue 4. – pp. 1894–1900.
16. Makwana P. Assessment of flexible pavement using the falling weight deflectometer: a comprehensive review. // Method. – 2023. – Vol. 31. No. 32. – pp. 33.
17. Nazarian S., Baker M., Crain K. Use of seismic pavement analyzer in pavement evaluation. // Transportation Research Record. – 1995. – pp. 1–8.
18. Pandya H.I., Ali A.A., Mehta Y.A. Enhancing falling weight deflectometer (FWD) testing: comprehensive review and development of robust procedure in the United States. // Journal of Testing and Evaluation. – 2024. – Vol. 52. No. 4. – pp. 2039–2054.
19. Qiao M., Wang X., Hou R. Case study: Validation of the spectral-analysis-of-surface-waves method for concrete pavement condition evaluation. // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. No. 20. – Art. No. 11410.
20. Wang H., Xie P., Ji R. Backcalculation of airfield pavement layer moduli under HWD testing. // In: Proceedings of 6th APT Conference accelerated pavement testing to transport infrastructure innovation. – 2020. – pp. 666–675.
21. Wu H., Wang S., Abdallah I., Nazarian S. A rapid approach to interpretation of SASW results. // Bearing capacity of roads. – 2022. – Vol. 1. – pp. 761–770.
22. Yin H. Simulation of flexible pavement response to FWD loads: A mechanistic approach. // International Journal of Pavement Research and Technology. – 2012. – Vol. 5. No. 4. – pp. 257.
23. Ziyadi M., Ozer H., Shakiba M., Al-Qadi I.L. Vehicle excess fuel consumption due to pavement deflection. // Road Materials and Pavement Design. – 2023. – Vol. 24. No. 3. – pp. 609–630.

References

1. Babeshko V.A., Glushkov E.V., Zinchenko Zh.F. Dynamics of inhomogeneous linear-elastic half-space. Moscow. Nauka. 1989. 344 p. (In Russ.)
2. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M., Uafa S.B., Lozovoy V.V., Evdokiomv V.S. On the earthquake precursor in the seismically dangerous mountainous area. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 33–44. DOI: 10.46698/VNC.2024.21.47.003. (In Russ.)
3. Volkova E.A., Lyapin A.A., Seleznev M.G., Uglova E.V. About the solution of inverse problems of construction mechanics on the basis of data of full-scale experiment. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2011. No. 2(626). pp. 65–71. (In Russ.)
4. Vorovich I.I., Babeshko V.A., Pryakhina O.D. Dynamics of massive bodies and resonance phenomena in deformable half-space. Moscow. Nauchnyi Mir. 1999. 246 p. (In Russ.)
5. Iliopolov S.K., Seleznev M.G., Uglova E.V. Dynamics of road structures. Rostov-on-Don. RSBU. 2002. 258 p. (In Russ.)
6. Lyapin A.A., Seleznev M.G., Seleznev N.M. Dynamic contact problem for a three-layer half-space with a cylindrical cavity. *Ecological Bulletin of the Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation*. 2008. No. 4. pp. 70–75. (In Russ.)
7. Razin A.V., Sobisevich A.L. Geoacoustics of layered half-space. Moscow. IPE RAS. 2012. 210 p. (In Russ.)
8. Tiraturyan A. N. Inverse calculation of the elasticity moduli of the layered half-space elements on the basis of the dynamic deformation analysis (by the example of highways). *Defectoscopy*. 2024. No. 8. pp. 52–61. DOI: 10.31857/S0130308224080059. (In Russ.)
9. Tiraturyan A.N. Perfection of non-destructive method for determining the mechanical characteristics of elements of multilayer structures on the example of road pavements. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*. 2023. No. 1. pp. 56–65. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.06. (In Russ.)
10. Aziz S.H.A., Taher M.N.M. Application of falling weight deflectometer (FWD) and synthetic fiber in the asphalt mixture: a review. *Recent Trends in Civil Engineering and Built Environment*. 2021. Vol. 2. No. 1. pp. 305–314.
11. Beskopylny A., Lyapin A., Andreev V. Layered structures mechanical properties assessment by dynamic tests. In: *Proceedings MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences. 2017. Vol. 117. Art No. 00018.
12. Goel A. Subsurface anomaly assessment in asphalt layers using Rayleigh waves dispersion characteristics: a test-pit study. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2024. pp. 1–21.
13. Gohil R.R., Kumar J., Parthasarathy C.R. Pavement testing using nondestructive MASW approach. In: *Proceedings of the Geo-Congress 2023*. 2023. pp. 163–172.
14. Gohil R.R., Samu V., Kumar J. Non-destructive evaluation of rigid pavements using surface wave tests. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 442. Art. No. 137651.
15. Madun A., Kamaruddin N.H.M., Remmani S.A. Numerical seismic approach for pavement investigation. *International Journal of Scientific and Technology Research*. 2020. Vol. 9. Issue 4. pp. 1894–1900.
16. Makwana P. Assessment of flexible pavement using the falling weight deflectometer: a comprehensive review. *Method*. 2023. Vol. 31. No. 32. pp. 33.
17. Nazarian S., Baker M., Crain K. Use of seismic pavement analyzer in pavement evaluation. *Transportation Research Record*. 1995. pp. 1–8.
18. Pandya H.I., Ali A.A., Mehta Y.A. Enhancing falling weight deflectometer (FWD) testing: comprehensive review and development of robust procedure in the United States. *Journal of Testing and Evaluation*. 2024. Vol. 52. No. 4. pp. 2039–2054.
19. Qiao M., Wang X., Hou R. Case study: Validation of the spectral-analysis-of-surface-waves method for concrete pavement condition evaluation. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. No. 20. Art. No. 11410.

20. Wang H., Xie P., Ji R. Backcalculation of airfield pavement layer moduli under HWD testing. *Proceedings of 6th APT Conference accelerated pavement testing to transport infrastructure innovation*. 2020. pp. 666–675.
21. Wu H., Wang S., Abdallah I., Nazarian S. A rapid approach to interpretation of SASW results. *Bearing capacity of roads*. 2022. Vol. 1. pp. 761–770.
22. Yin H. Simulation of flexible pavement response to FWD loads: A mechanistic approach. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2012. Vol. 5. No. 4. pp. 257.
23. Ziyadi M., Ozer H., Shakiba M., Al-Qadi I.L. Vehicle excess fuel consumption due to pavement deflection. *Road Materials and Pavement Design*. 2023. Vol. 24. No. 3. pp. 609–630.