

МЕХАНИКА MECHANICS



УДК 539.3

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-4-2184>

Анализ диссипации энергии деформирования в дорожных одеждах с укрепленными слоями

А.Н. Тиратурян 

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ tiraturjan@list.ru

EDN: JZUDVV

Аннотация

Введение. Конструирование дорожных одежд автомобильных дорог — ключевой этап проектирования, напрямую влияющий на их долговечность и эксплуатационные расходы. В последние годы в условиях роста интенсивности и динамической нагрузки транспорта получили распространение такие технологии укрепления земляного полотна и оснований, как геосинтетические армирования и стабилизированные слои, что делает изучение их эффективности особенно актуальным. В литературе отмечаются практические преимущества укрепленных слоёв — повышение несущей способности и снижение деформаций. Однако недостаточно разработаны модели диссипации энергии при динамических воздействиях в конструкциях с такими слоями. Теоретические подходы к анализу рассеяния энергии, включая линейно-упругие и вязкоупругие модели и методы конечных элементов, в основном применялись к традиционным конструкциям, их адаптация для армированных и стабилизированных слоёв требует доработки, поскольку остаются пробелы в количественном сравнении эффективности по местоположению и жёсткости укреплений. Цель представленной работы — анализ диссипации энергии деформирования в структуре дорожных одежд с различными вариантами расположения укрепленных слоев и определение оптимальных конструктивных решений, способствующих повышению долговечности дорожных покрытий. Для ее достижения необходимо было формализовать модель диссипации энергии для конструкций с укреплениями, провести сравнительный анализ вариантов расположения и жёсткости слоёв.

Материалы и методы. В рамках исследования применен комплексный подход к анализу процессов деформирования слоистых сред на примере дорожных одежд, предполагающий применение как расчетного аппарата, так и современного экспериментального оборудования. В качестве расчетного аппарата использовалась математическая модель слоистого полупространства в осесимметричной постановке в цилиндрической системе координат, базирующаяся на решении системы динамических уравнений Ламе и позволяющая строить амплитудно-временные характеристики вертикальных перемещений и импульса ударного нагружения, на основе которых возможно построение динамических петель гистерезиса. В качестве экспериментального оборудования применена установка ударного нагружения FWD PRIMAX 1500, позволяющая регистрировать аналогичные характеристики отклика дорожной одежды в натурных условиях при нагружении, эквивалентном расчетному.

Результаты исследования. В ходе исследования выполнено численное моделирование конструкций дорожных одежд, традиционно используемых в Российской Федерации, и так называемых полноглубинных дорожных одежд, состоящих практически полностью из материалов, укрепленных вяжущими. Построены динамические петли гистерезиса и дано сравнительное описание полученных результатов. В ходе численного эксперимента установлено, что укрепление только слоя земляного полотна даже без устройства укрепленного слоя основания под асфальтобетоном позволяет снизить величину рассеиваемой энергии деформирования. Также сделан вывод о том, что в наибольшей степени влияние на величину рассеиваемой энергии оказывает именно модуль упругости подстилающего полупространства, моделирующего земляное полотно.

Обсуждение. Наибольший эффект, как технический, так и экономический, может быть достигнут путем укрепления верха земляного полотна с сохранением несвязных слоев в основании дорожной конструкции. Это решение позволит приблизить функционирование дорожной одежды к упругой стадии и вместе с тем снизить риски появления трещин на поверхности покрытия из-за излишне жесткого слоя укрепленного основания.

Заключение. На основании построенных динамических петель гистерезиса показано, что снижение величины энергии деформирования может быть достигнуто как устройством укрепленных слоев дорожной одежды по всей ее глубине, так и локальным укреплением слоя подстилающего полупространства и дополнительного слоя основания из песка. В ходе численного эксперимента доказано, что устройство укрепленных слоев оснований более чем в 2–3 раза снижает величину диссипации энергии деформирования в структуре дорожной одежды. Продемонстрировано качественное совпадение результатов экспериментальных исследований и результатов численного моделирования.

Ключевые слова: дорожные одежды, диссипация энергии, установка ударного нагружения, петли динамического гистерезиса

Благодарности. Автор выражает благодарность редакционной коллегии журнала и рецензентам за профессиональный анализ статьи и рекомендации для ее корректировки.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-29-00110), <https://rscf.ru/project/24-29-00110/>

Для цитирования. Тиратурян А.Н. Анализ диссипации энергии деформирования в дорожных одеждах с укрепленными слоями. *Advanced Engineering Research*. 2025;25(4):324–336. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-4-2184>

Original Theoretical Research

Analysis of Deformation Energy Dissipation in Reinforced-Layer Pavement

Artem N. Tiraturyan 

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

✉ tiraturjan@list.ru

Abstract

Introduction. The design of road pavements for highways is a key stage of project development, directly impacting their durability and operational costs. In recent years, in the context of increasing traffic intensity and dynamic loads, technologies for strengthening roadbeds and bases, such as geosynthetic reinforcement and stabilized layers, have become widespread, making the study on their efficiency a challenge. Literature notes the practical advantages of reinforced layers — increased load-bearing capacity and reduced deformation. However, models for energy dissipation under dynamic impacts in structures with such layers are underdeveloped. Theoretical approaches to analyzing energy dissipation, including linear-elastic and viscoelastic models and finite element methods, have been primarily applied to traditional structures. Their adaptation to reinforced and stabilized layers requires further development, as there remain gaps in the quantitative comparison of efficiency by location and rigidity of reinforcements. The objective of the presented work is to analyze the dissipation of deformation energy in the structure of road pavements with different options for the arrangement of reinforced layers, and to determine optimal design solutions that contribute to increasing the durability of road pavements. To achieve this, it is required to formalize an energy dissipation model for structures with reinforcements, conduct a comparative analysis of different locations and rigidity levels of the layers.

Materials and Methods. The research utilized a comprehensive approach to the analysis of deformation processes in layered media using road pavements as an example, involving both a calculation tool and modern experimental equipment. As a calculation tool, a mathematical model of a layered half-space in an axisymmetric formulation in a cylindrical coordinate system was used. It was based on the solution to the system of dynamic Lamé equations and allowed for the construction of amplitude-time characteristics of vertical displacements and impact loading impulse, on the basis of which it was possible to construct dynamic hysteresis loops. The FWD PRIMAX 1500 shock loading unit was used as experimental equipment, which made it possible to register similar characteristics of the road pavement response under field conditions at a load equivalent to the calculated one.

Results. The study involved numerical modeling of road pavement structures traditionally used in the Russian Federation and so-called full-depth road pavements, which were composed almost entirely of materials reinforced with binders. Dynamic hysteresis loops were constructed, and a comparative analysis of the results was provided. A numerical experiment revealed that strengthening only the subgrade layer, even without installing a reinforced base layer beneath the asphalt concrete, reduced the amount of dissipated deformation energy. It was also concluded that the elastic modulus of the underlying half-space simulating the subgrade had the greatest impact on the amount of dissipated energy.

Discussion. The greatest effect, both technical and economic, can be reached by strengthening the top of the roadbed while preserving the loose layers in the base of the road structure. This solution will bring the functioning of the road surface closer to the elastic stage and at the same time reduce the risk of cracks appearing on the surface of the pavement due to an excessively rigid layer of reinforced base.

Conclusion. On the basis of the constructed dynamic hysteresis loops, it is shown that a reduction in the magnitude of deformation energy can be obtained both by installing reinforced layers of the road surface throughout its entire depth, and by locally strengthening the underlying half-space layer and an additional base layer made of sand. The numerical experiment demonstrated that the use of reinforced base layers reduced the amount of deformation energy dissipation in the pavement structure by more than 2–3 times. Qualitative agreement between the experimental results and the numerical simulation results was shown.

Keywords: road pavements, energy dissipation, shock loading unit, dynamic hysteresis loops

Funding Information. The research was done with the financial support from the Russian Science Foundation (grant no. 24-29-00110), <https://rscf.ru/project/24-29-00110/>

Acknowledgements. The author would like to thank the Editorial board of the Journal and the reviewers for their professional analysis of the article and recommendations for its correction.

For Citation. Tiraturyan AN. Analysis of Deformation Energy Dissipation in Reinforced-Layer Pavement. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(4):324–336. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-4-2184>

Введение. Одной из важнейших задач дорожной отрасли Российской Федерации является обеспечение 24-летнего межремонтного срока службы дорожных покрытий. Один из основных путей ее решения — совершенствование подходов к конструированию дорожных одежд. В практике РФ принято конструировать их таким образом, чтобы жесткость слоев возрастала снизу вверх, что связано как с историческими подходами к проектированию, так и с некоторыми особенностями расчета напряженно-деформированного состояния покрытия инженерными методами при помощи специальных номограмм. Но такой подход не позволяет в полной мере отразить эффективность применения укрепленных слоев, например земляного полотна или оснований дорожных одежд.

В последние годы в технологиях и методах расчета дорожных одежд произошли существенные изменения, связанные с внедрением программных комплексов, реализующих как точные, так и численные схемы прямого расчета слоистых сред [1]. В области численных методов наибольшее распространение получили как классические конечно-элементные подходы [2], так и более современные методы, основанные на применении спектральных элементов [3].

Метод конечных элементов широко используется при моделировании напряженно-деформированного состояния образцов из асфальтобетона и цементобетона, применяемых для устройства дорожных покрытий и оснований [4], а также при расчете объектов ограниченных размеров, характерных для практики дорожного и промышленно-гражданского строительства [5]. Однако большинство указанных программных комплексов реализует преимущественно линейно-упругую статическую постановку задачи определения напряженно-деформированного состояния дорожных одежд. Более широкое распространение численных методов сдерживается сложностью их применения к средам неограниченного объема [6]. В то же время реальное деформирование слоев дорожных одежд наиболее корректно описывается вязкоупругими моделями либо моделями, учитывающими отток объемных волн в бесконечное пространство [7].

При решении задач в вязкоупругой динамической постановке, как правило, рассматривается отклик дорожной конструкции либо на ударное воздействие, эквивалентное динамическому воздействию расчетной нагрузки [8], либо непосредственно на нагрузку от колеса, движущегося по поверхности покрытия [9].

Одним из наиболее распространенных современных решений проблемы является конструирование так называемых полноглубинных (full-depth) конструкций дорожных одежд, полностью состоящих из укрепленных минеральными и комплексными вяжущими слоев [10]. Данный подход имеет ряд достоинств и недостатков. К несомненным достоинствам следует отнести общую высокую жесткость конструкций и возможность использования вторичных материалов для устройства слоев оснований и их дополнительных слоев [11]. Также в ряде научных работ, посвященных этой теме, отмечается хорошая устойчивость таких конструкций к накоплению пластических деформаций [12], возможность применения в различных природно-климатических условиях [13] и высокая технологичность [14]. К недостаткам можно отнести высокую стоимость и часто при излишне высокой жесткости слоев основания большую вероятность растрескивания [15]. Одним из наиболее распространенных видов растрескивания для таких конструкций является отраженное трещинообразование [16]. Некоторые авторы отмечают также необходимость учета специфических свойств подобных конструкций в регионах с холодным климатом [17] и влияния различных видов дефектов на изменение сроков эксплуатации покрытия [18].

Известна концепция «вечных» дорожных одежд, предполагающая увеличение жесткости конструктивных слоев дорожной одежды сверху вниз, т. е. когда в качестве слоя основания используются материалы, обладающие более высоким модулем упругости, чем асфальтобетонные слои покрытия [19]. Такие конструкции действительно обеспечивают чрезвычайно высокие межремонтные сроки службы, что позволяет заменять лишь верхние слои износа [20]. Вместе с тем очевидно, что стоимость и надежность подобных конструкций, несомненно, являются чрезвычайно высокими и зачастую не всегда оправданными [21]. При этом дополнительных исследований требуют вопросы обеспечения надлежащего сцепления между конструктивными слоями различной жесткости [22].

Таким образом, можно утверждать, что существует множество подходов к конструированию дорожных одежд, что, с одной стороны, подчеркивает эффективность подобных конструкций, а с другой — все еще оставляет много вопросов. Один из них — исследование процессов диссипации энергии деформирования в слоистых средах с укрепленными слоями, и как следствие — оценка возможности смещения механизмов деформирования к упругой стадии. Величина диссипации энергии является наиболее полной и физически обоснованной характеристикой, отражающей механизмы деформирования в структуре многослойной среды, которая может быть измерена и количественно оценена как с применением средств математического моделирования, так и с использованием современного измерительного оборудования. Более того, применение данного показателя является перспективным в контексте такого актуального направления, как анализ жизненного цикла объектов строительства [23] и внедрение его в технологии информационного моделирования для контроля остаточного срока службы [24]. Таким образом, целью данной работы является анализ диссипации энергии деформирования в структуре дорожных одежд с различными вариантами расположения укрепленных слоев и оценка оптимальных конструктивных решений, способствующих повышению долговечности дорожного покрытия.

Материалы и методы. В ходе проведенного исследования были применены теоретический и экспериментальный подходы к оценке деформирования слоистой среды дорожной одежды. Методология исследования представлена на рис. 1.



Рис. 1. Методология исследования

В ходе проведения численных и экспериментальных исследований рассматривались следующие конструкции дорожных одежд. Конструкция 1 представляет собой стандартный вариант дорожной одежды, запроектированный в соответствии с действующими требованиями ГОСТ Р 71404: слой 1 устроен из асфальтобетона, слой 2 — из укрепленной комплексным вяжущим щебеночно-песчаной смеси, слои 3 и 4 — слой щебня, устроенного по способу заклинки, и песчаный морозозащитный капилляропрерывающий слой соответственно.

Конструкция 2 — это пример полноглубинной дорожной конструкции, в которой все слои укреплены органическими или комплексными вяжущими, что неизбежно сказывается на повышении их модулей упругости. При этом очевидно, что за счет применения дорогостоящих стабилизирующих и укрепляющих добавок, а также из-за отсутствия возможности снижения толщины конструктивных слоев в рамках действующей нормативной базы стоимость данной конструкции будет значительно превышать стоимость конструкции 1, в которой присутствуют необработанные вяжущими слои. Конструкция 3 аналогична по своим параметрам конструкции 1, но только слой 2 и слой 5 (грунт земляного полотна) укреплены комплексным вяжущим. Конструкция 4 предполагает укрепление вяжущим только грунта земляного полотна. Схематично рассматриваемые конструкции представлены на рис. 2.

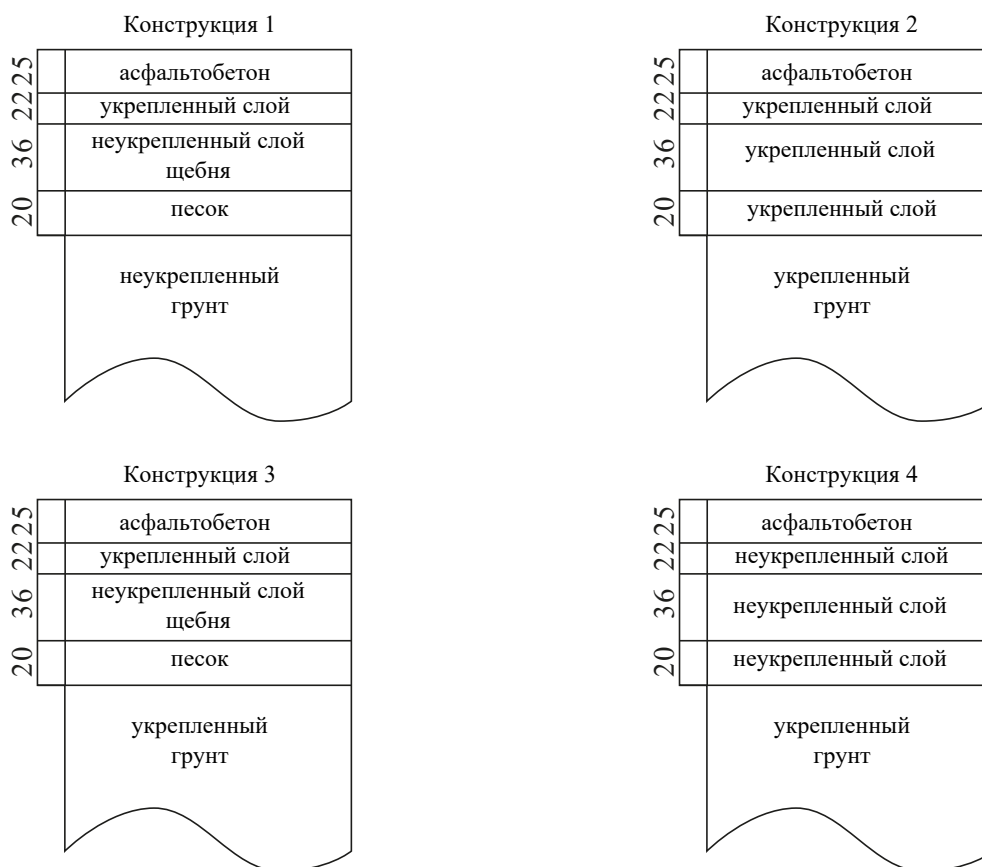


Рис. 2. Конструкции моделируемых дорожных одежд

Теоретический подход заключался в определении напряженно-деформированного состояния слоистой среды под воздействием динамической нагрузки от падающего груза в осесимметричной постановке (рис. 3).

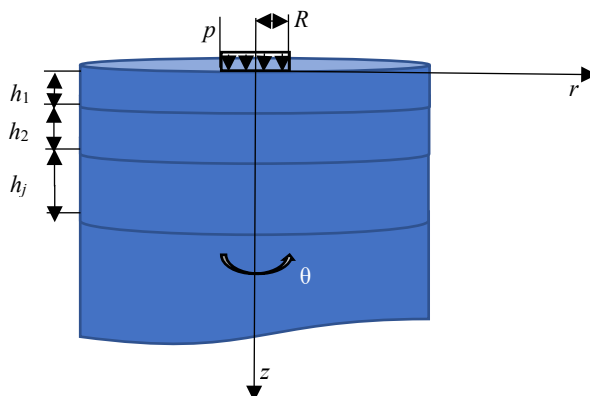


Рис. 3. Многослойное полупространство

Уравнения движения имеют вид [25, 26]:

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial r} + \mu \Delta u_r - \frac{\mu}{r^2} u_r = \rho \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2}, \quad (1)$$

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial z} + \mu \Delta u_z = \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2},$$

где λ, μ — коэффициенты Ламе; u_r, u_z — радиальная и вертикальная компоненты вектора смещения; ρ — плотность материала.

$$\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial (r u_r)}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad (2)$$

где r — радиальная координата точки, в которой отыскивается смещение.

Преобразованная по Фурье система уравнений (1) приобретает вид [27]:

$$\text{grad div } \mathbf{u}^j(\mathbf{r}) - \frac{c_{j1}^2}{c_{j2}^2} \text{rot rot } \mathbf{u}^j(\mathbf{r}) + c_{j1}^2 \mathbf{u}^j(\mathbf{r}) = 0, \quad (3)$$

где c_{j1}, c_{j2} — приведенные частоты колебаний.

$$c_{j1}^2 = \frac{\omega^2 R^2}{Vp_j^2}; \quad (4)$$

$$c_{j2}^2 = \frac{\omega^2 R^2}{Vs_j^2};$$

где ω — частота колебаний, рад/с; R — радиус площадки нагружения; Vp_j, Vs_j — скорости продольных и поперечных волн в теле.

Данная форма записи позволяет воспользоваться принципом упругого-вязкоупругого соответствия, по которому коэффициенты Ламе становятся комплексными, что, в свою очередь, приводит к комплекснозначности приведенных частот c_{j1}, c_{j2} .

Так как перемещение \mathbf{u} может быть выражено через скалярную φ и векторную (вихревую) ψ составляющие, далее решение будет рассматриваться в форме представления Ламе в виде:

$$\Delta \varphi + c_{j1}^2 \varphi = 0, \quad (5)$$

$$\Delta \psi + c_{j2}^2 \psi = 0.$$

Граничные условия данной задачи в напряжениях формулируются в виде:

$$\begin{cases} \sigma_z(r, z, t)|_{z=0} = \begin{cases} p(t), r \in [0, R] \\ 0, r > R \end{cases} \\ \tau_{rz}(r, z, t)|_{z=0} \equiv 0 \end{cases} \quad (6)$$

На границах слоев ставятся условия жесткого сцепления, требующие непрерывности перемещений $u_r(r, z, t)$ и $u_z(r, z, t)$ и напряжений $\sigma_z(r, z, t), \tau_{rz}(r, z, t)$.

На бесконечности выполняются условия стремления к нулю всех компонент напряжений и перемещений.

Начальные условия данной задачи определяются следующим образом:

$$u_{r,z}(r, z, t)|_{t=0} = 0; \quad \frac{\partial u_{r,z}(r, z, t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0. \quad (7)$$

Дальнейшее решение строится путем применения свойств интегральных преобразований Ханкеля и Фурье к системе уравнений (3) и излагается в работе [28]. Так как рассматривается решение нестационарной задачи, применяется метод дискретного гармонического анализа [29].

Экспериментальный подход к оценке деформирования слоистой среды дорожного покрытия предполагает проведение инструментальных измерений параметров деформирования дорожных одежд. В качестве оборудования для таких измерений использовалась установка ударного нагружения FWD PRIMAX 1500 [30, 31] (рис. 4). Данная установка представляет собой прицеп со смонтированными на нем механизмом ударного нагружения и измерительной балкой, регистрирующей вертикальную компоненту скорости перемещений, впоследствии пересчитываемой в абсолютные значения вертикальных перемещений. Регистрация характеристик деформирования осуществлялась датчиками-измерителями. На рис. 5 показаны расстояния от них до штампа установки динамического нагружения. Для проведенного исследования использовался только датчик D1, расположенный в центре штампа. Однако в перспективе для оценки процессов распределения энергии деформирования могут быть использованы и остальные датчики.

Отличием данной установки ударного нагружения от прочих 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, по которым возможно построение экспериментальной петли гистерезиса.



Рис. 4. Установка ударного нагружения для регистрации вертикальных перемещений на слое из органоминеральной смеси

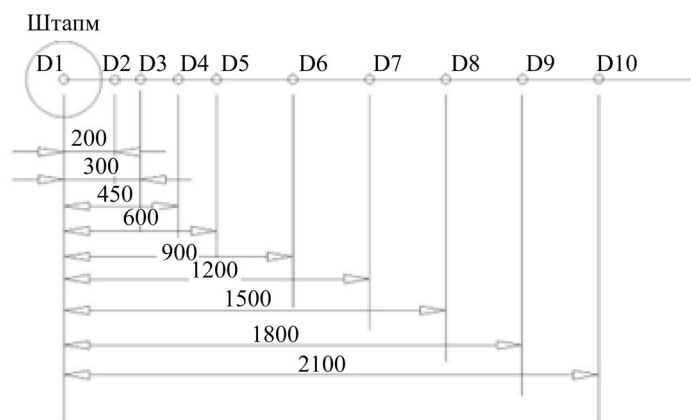


Рис. 5. Схема проведения измерений установкой ударного нагружения (расстояния даны в мм)

В данном исследовании рассмотрены конструкции дорожной одежды с различным соотношением жесткостей конструктивных слоев. Механические параметры представлены в таблице 1.

Таблица 1

Конструкции дорожных одежд для моделирования

Слой	Конструкция 1					Конструкция 2				
	E , МПа	ν	$tg\gamma$	h , см	ρ , кг/м ³	E , МПа	ν	$tg\gamma$	h , см	ρ , кг/м ³
1	3500	0,30	0,25	25	2400	3500	0,30	0,25	25	2400
2	1000	0,25	0,15	22	2400	1000	0,25	0,15	22	2400
3	450	0,25	–	36	1600	1000	0,25	0,15	36	2400
4	120	0,25	–	20	1900	500	0,25	–	20	2200
5	43	0,3	–	–	1900	400	0,3	–	–	2200
Конструкция 3					Конструкция 4					
E , МПа	ν	$tg\gamma$	h , см	ρ , кг/м ³	E , МПа	ν	$tg\gamma$	h , см	ρ , кг/м ³	E , МПа
3500	0,30	0,25	25	2400	3500	0,30	0,25	25	2400	3500
1000	0,25	0,15	22	2400	450	0,25	–	22	1600	1000
450	0,25	–	36	1600	450	0,25	–	36	1600	450
120	0,25	–	20	1900	120	0,25	–	20	1900	120
400	0,3	–	–	2200	400	0,3	–	–	2200	400

Результаты исследования. С использованием математического моделирования для представленных выше конструкций была решена задача определения динамического напряженно-деформированного состояния и построены петли гистерезиса на поверхности каждой из них. Решение задачи для слоистой среды позволяет построить амплитудно-временные характеристики перемещений $u(t)$ на поверхности слоистой среды и амплитудно-временную характеристику импульса $F(t)$, по которой может быть восстановлена динамическая петля гистерезиса, площадь которой определяет энергию, необратимо рассеиваемую в среде [32, 33]. Данная кривая задается параметрически в соответствии с зависимостью (8):

$$W = \int_0^t u(t) F(t) dt. \tag{8}$$

В случае задания динамической петли гистерезиса в виде ряда данных, содержащих информацию о дискретных величинах фактической нагрузки (F_i) и вертикальных перемещениях (u_i), соответствующих данной нагрузке, площадь кривой гистерезиса определяется в соответствии с (9):

$$W = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^{n-1} u_i F_{i+1} + u_n F_1 - \sum_{i=1}^{n-1} u_{i+1} F_i - u_1 F_n \right|. \quad (9)$$

Функция $F(t)$ описывается уравнением:

$$F(t) = F \sin\left(\frac{\pi t}{t_{\text{имп}}}\right) \quad (10)$$

где F — расчетная нагрузка (принимается равной 57,5 кН); t — время наблюдения за деформированием объекта ($t = 0,1$ с); $t_{\text{имп}}$ — время импульса ($t_{\text{имп}} = 0,03$ с).

Также реализована возможность построения амплитудно-временной характеристики пилообразного импульса и треугольного импульса, нередко используемых при аппроксимации ударного нагружения, воспроизводимого установками FWD.

В качестве расчетной нагрузки при моделировании была принята нагрузка от падающего груза величиной 57,5 кН, распределенная по площадке диаметром 30 см, что соответствует требованиям нормативной документации дорожной отрасли. Величина диссипации энергии деформирования (W) рассчитывалась в точке ударного нагружения.

Учитывая предположение о необходимости работы дорожной одежды в упругой стадии, допускаемое в отечественных нормативных документах, а также тот факт, что величина энергии W является по сути функцией как механических, так и геометрических параметров исследуемой среды, задача оптимального конструирования может быть сведена к уравнению:

$$W(E_j, h_j, \tan \gamma_j, \nu_j) \rightarrow \min, \quad (11)$$

где E_j — модули упругости материалов слоев дорожной одежды; h_j — толщины слоев дорожной одежды; γ_j — углы потерь или иные характеристики вязкости материала слоев; ν_j — коэффициенты Пуассона материалов слоев.

Демпфирующие свойства отдельных слоев учитываются путем введения тангенса угла потерь $tg\gamma$, определяемого исходя из приведенных частот колебаний:

$$tg\gamma_j = \frac{Im c_j^2}{Re c_j^2}.$$

На рис. 6 приведены расчетные формы амплитудно-временных характеристик перемещений на поверхности моделируемых дорожных одежд. На рис. 7 представлены различные варианты формы импульса ударного нагружения, в частности, синусоидальная, пилообразная и треугольная, соответствующие различным вариантам приложения ударной нагрузки. В рамках данного исследования рассматривалась синусоидальная форма, в наибольшей степени отвечающая экспериментальному нагружению, воспроизводимому установкой ударного нагружения FWD.

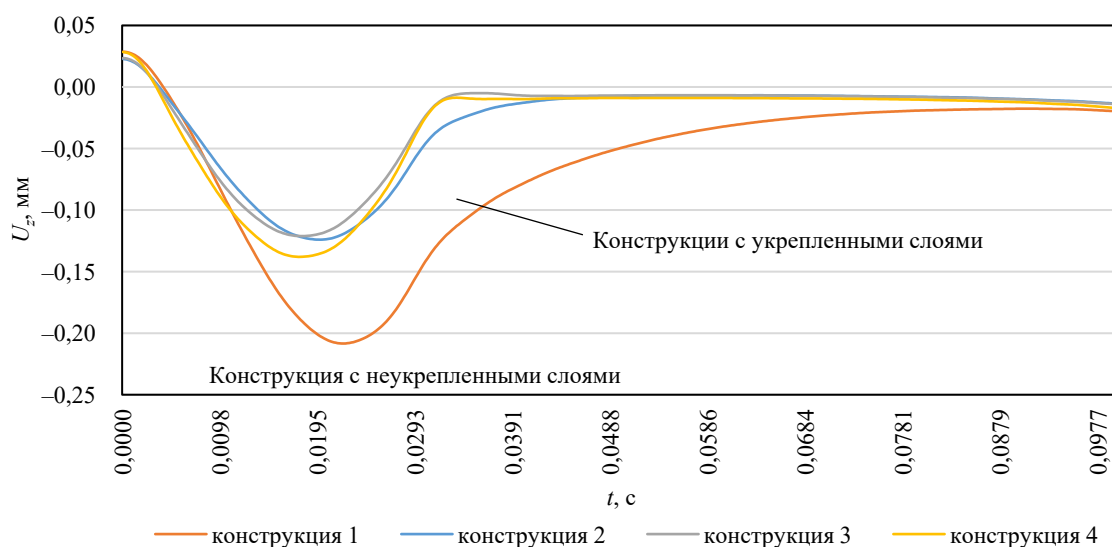


Рис. 6. Расчетная амплитудно-временная характеристика перемещения на поверхности исследуемых конструкций

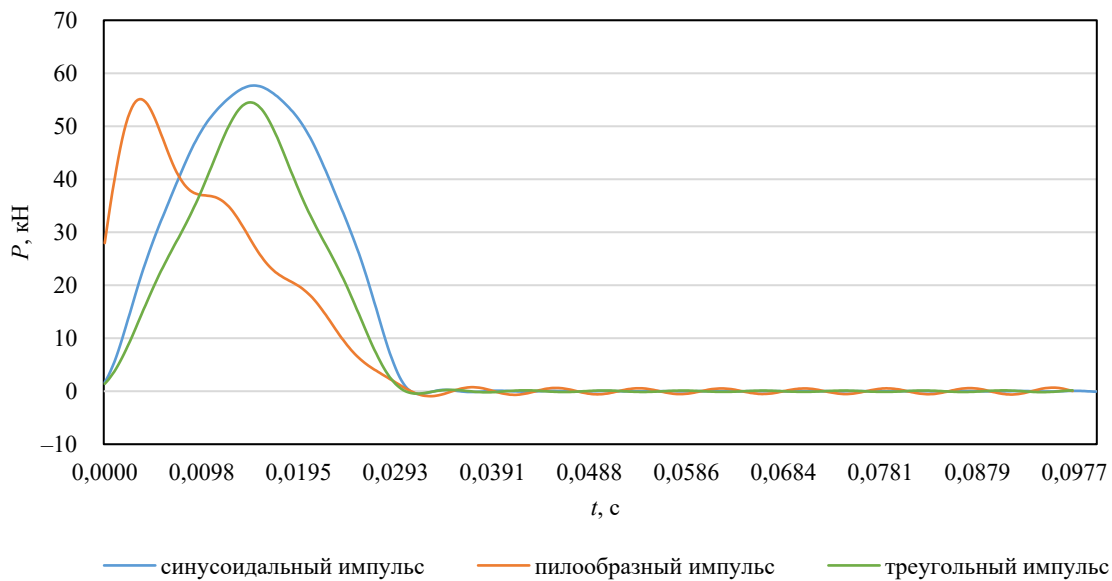


Рис. 7. Расчетные формы импульса нагрузки на поверхности конструкции дорожной одежды 4

Результаты построения динамических петель гистерезиса и результаты определения динамической энергии деформирования представлены на рис. 8 и в таблице 2 соответственно.

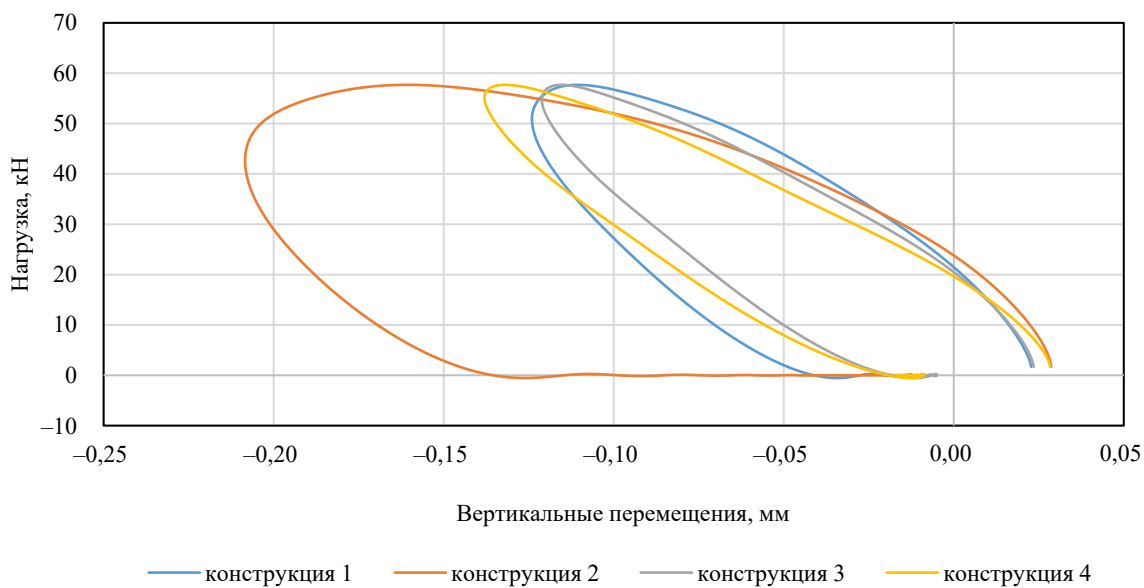


Рис. 8. Динамические петли гистерезиса, рассчитанные на поверхности конструкций дорожных одежд

Таблица 2

Расчетная величина энергии деформирования, рассеянной в конструкциях

Слой	Энергия деформирования, Дж/м ³
Конструкция 1	9,43
Конструкция 2	3,00
Конструкция 3	3,27
Конструкция 4	3,56

Для экспериментального подтверждения полученных результатов были проведены измерения установкой ударного нагружения FWD PRIMAX 1500 на реальных эксплуатируемых дорожных одеждах, конструкция которых была аналогична конструкциям 1, 3 и 4, приведенным в таблице 1. Полученные экспериментальные формы петель динамического гистерезиса представлены на рис. 9, а экспериментальные значения энергии деформирования, рассеянной в конструкции, представлены в таблице 3.

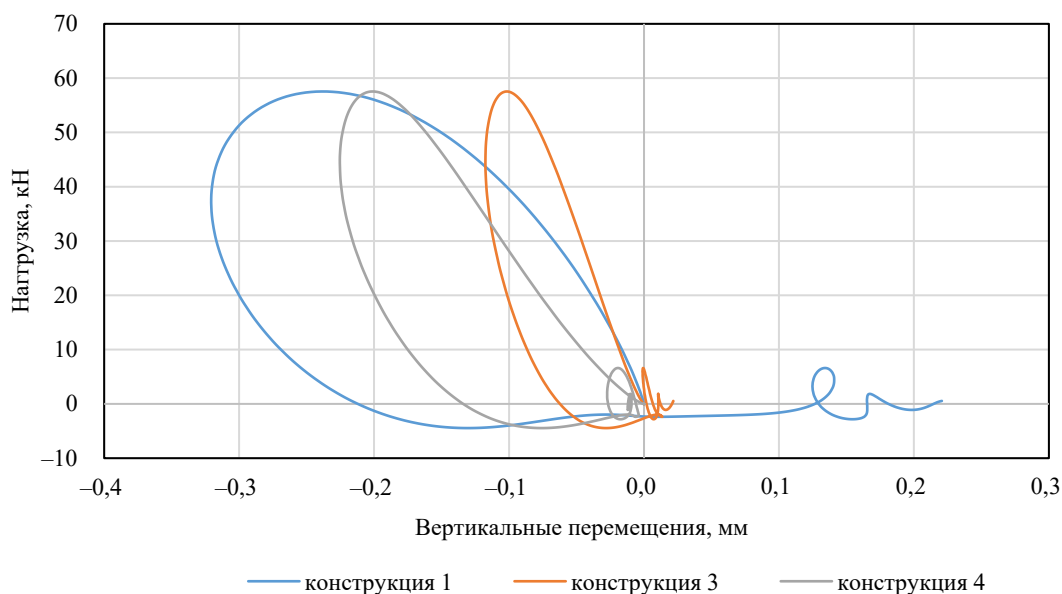


Рис. 9. Динамические петли гистерезиса, инструментально зарегистрированные на поверхности конструкций дорожных одежд

Таблица 3

Экспериментальная величина энергии деформирования, рассеянной в конструкциях

Слой	Энергия деформирования, Дж/м ³
Конструкция 1	9,44
Конструкция 3	3,74
Конструкция 4	4,56

Варианты конструкции дорожной одежды, аналогичной конструкции 2, на текущий момент проходят стадии технико-экономического обоснования применимости и в натуральных условиях дорожной сети РФ не реализованы.

Обсуждение. Анализируя данные таблицы 2 и 3, можно сделать вывод, что наибольшая величина рассеяния энергии деформирования характерна для традиционного варианта конструкции 1, в котором жесткости конструктивных слоев увеличиваются снизу вверх. Наименьшая величина рассеяния энергии, несомненно, характерна для самой жесткой конструкции, 2, предполагающей устройство всех слоев с применением укрепления вяжущими. Однако нужно отметить, что почти такой же эффект может быть достигнут путем укрепления в первую очередь рабочего слоя земляного полотна. Так, на основе результатов численного моделирования установлено, что укрепление только слоя земляного полотна даже без устройства укрепленного слоя основания под асфальтобетоном позволяет снизить величину рассеиваемой энергии деформирования с 9,43 до 3,56 Дж/м³. Также можно сделать вывод, что в наибольшей степени влияние на величину рассеиваемой энергии оказывает именно модуль упругости подстилающего полупространства, моделирующего земляное полотно. Таким образом, наибольший эффект, как технический, так и экономический, может быть достигнут путем укрепления верха земляного полотна с сохранением несвязных слоев в основании дорожной конструкции (аналогично конструкциям 3 и 4). Это решение позволит приблизить функционирование дорожной одежды к упругой стадии и вместе с тем снизить риски появления трещин на поверхности покрытия из-за излишне жесткого слоя укрепленного основания. Эти результаты моделирования в целом подтверждаются результатами натурного эксперимента, в рамках которого установлено, что экспериментальная энергия деформирования на поверхности неукрепленной конструкции 1, составляющая 9,44 Дж/м³, при наличии укрепленного слоя земляного полотна снижается до 4,56 Дж/м³, а при наличии укрепленного слоя основания под асфальтобетоном и укрепленного слоя земляного полотна — до 3,74 Дж/м³. Данный факт подтверждает качественное совпадение результатов натуральных и расчетных экспериментов. Результаты исследований могут быть применены при обосновании конкурирующих вариантов устройства дорожной одежды, а также развиты для отрасли эксплуатации автомобильных дорог с точки зрения оценки их остаточного ресурса [34, 35]. Важным выводом является установление наибольшего влияния на величину диссипации энергии деформирования именно укрепления слоя земляного полотна. В последние годы проблема применения различных укрепляющих добавок для грунтов активно поднимается на различных уровнях [36–38]. После получения

большого количества данных об укреплении земляного полотна с применением соответствующих добавок и стабилизации полученные результаты могут быть использованы для доказательства эффекта от их введения. Несомненно, это потребует проведения исследований с применением установок динамического нагружения и штамповых испытаний [39, 40], которые позволяют напрямую регистрировать петли динамического гистерезиса и кривые нагрузки-разгрузки и получить необходимую информацию о расчетных характеристиках подобных слоев. Также представленный в исследовании подход может быть эффективно отработан на полигонах ускоренного тестирования дорожных одежд [41] и использован для калибровки моделей при ухудшения их эксплуатационного состояния [42].

Заключение. Таким образом, в результате проведенного в рамках данной работы анализа диссипации энергии деформирования в структуре дорожных одежд с различными вариантами расположения укрепленных слоев и оценки наиболее эффективных вариантов расположения укрепленных слоев в структуре дорожной одежды установлено, что наибольшее влияние на величину диссипации энергии деформирования оказывает укрепление земляного полотна, моделируемого как упругое полупространство, не ограниченное по толщине. Данный вывод подтвержден в ходе экспериментальных исследований, показавших аналогичную качественную картину изменения рассеиваемой энергии деформирования в конструкции, включающей только неукрепленные слои, конструкции с укрепленным слоем земляного полотна и конструкции с укрепленным слоем основания и укрепленным слоем земляного полотна. Показано, что устройство укрепленных слоев оснований более чем в 2–3 раза снижает величину диссипации энергии деформирования в структуре дорожной одежды.

Список литературы / References

1. Raza MS, Sharma SK. A Review of Mechanical and Durability Properties and Microstructure of Semi-Flexible Pavement. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2024;9(4):83. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01393-w>
2. Ghanizadeh AR, Salehi M, Mamou A, Koutras EI, Jalali F, Asteris PG. Investigation of Subgrade Stabilization Life-Extending Benefits in Flexible Pavements Using a Non-Linear Mechanistic-Empirical Analysis. *Infrastructures*. 2024;9(2):33. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9020033>
3. Bei Zhang, Di Wang, Yanhui Zhong, Xiaolong Li, Hongjian Cai, Tao Wang. Mechanical Analysis of Semi-Rigid Base Asphalt Pavement under the Influence of Groundwater with the Spectral Element Method. *Applied Sciences*. 2024;14(6):2375. <https://doi.org/10.3390/app14062375>
4. Klyuev SV, Klyuev AV, Ayubov NA, Fediuk RS, Levkina EV. Finite Element Design and Analysis of Sustainable Mono-Reinforced and Hybrid-Reinforced Fibergeopolymers. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(3):171–185. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-171-185>
5. Tretyakov DA, Osovik DS. Estimation of Stresses in a Plate with a Concentrator through Ultrasonic Measurements of Acoustic Anisotropy. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(4):307–315. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-307-315>
6. Babushkina NE, Lyapin AA. Determination of Dynamic Stresses and Displacements under the Action of an Impact Load on a Two-Layer Structure during the Indentation Process. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(3):264–273. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-264-273>
7. Tiraturyan AN, Lyapin AA. Analysis of the Deformation Energy Dissipation in a Layered Medium Under Dynamic Loading (On the Example of Highways). *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2024;61:445–451. <https://doi.org/10.1007/s11204-024-09995-3>
8. Xinnan Xu, Mohan Zhao, Yu Liu, Chaofan Wu, Yuhao Pei, Chengmiao Zhang. Falling Weight Impact Acceleration-Time Signals Analysis for Road Modulus Detection: Theoretical and Experimental Investigations. *Case Studies in Construction Materials*. 2024;21:e03915. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03915>
9. Zhenlong Gong, Yinghao Miao, Lantieri C. Review of Research on Tire–Pavement Contact Behavior. *Coatings*. 2024;14(2):157. <https://doi.org/10.3390/coatings14020157>
10. Yongxiang Li, Longwei Zhao, Junfeng Gao, Yanyan Ru, Haiwei Zhang. Evaluation of the Fatigue Performance of Full-Depth Reclamation with Portland Cement Material Based on the Weibull Distribution Model. *Coatings*. 2024;14(4):437. <https://doi.org/10.3390/coatings14040437>
11. Yongxiang Li, Chuangdan Luo, Kuiliang Ji, Haiwei Zhang, Bowei Sun. Laboratory Evaluation of Strength Performance of Full-Depth Reclamation with Portland Cement Material. *Coatings*. 2024;14(5):573. <https://doi.org/10.3390/coatings14050573>
12. Mendoza-Sanchez JF, Alonso-Guzman EM, Martinez-Molina W, Chavez-Garcia HL, Soto-Espitia R, Delgado-Alamilla H, et al. A Critical Review of Pavement Design Methods Based on a Climate Approach. *Sustainability*. 2024;16(16):7211. <https://doi.org/10.3390/su16167211>
13. Karki B, Prova S, Isied M, Souliman M. Neural Network Approach for Fatigue Crack Prediction in Asphalt Pavements Using Falling Weight Deflectometer Data. *Applied Sciences*. 2025;15(7):3799. <https://doi.org/10.3390/app15073799>

14. Chunru Cheng, Linbing Wang, Xingye Zhou, Xudong Wang. Predicting Rutting Development Using Machine Learning Methods Based on RIOCHTrack Data. *Applied Sciences*. 2024;14(8):3177. <https://doi.org/10.3390/app14083177>
15. Cheng Shen, Zhengguang Wu, Peng Xiao, Aihong Kang, Yangbo Wang. Experimental Research on the Anti-Reflection Crack Performance of Basalt Fiber Modified Rubber Asphalt Stress-Absorbing Layer. *Materials*. 2024;17(9):2013. <https://doi.org/10.3390/ma17092013>
16. Rui Ma, Yiming Li, Peifeng Cheng, Xiule Chen, Aoting Cheng. Low-Temperature Cracking and Improvement Methods for Asphalt Pavement in Cold Regions: A Review. *Buildings*. 2024;14(12):3802. <https://doi.org/10.3390/buildings14123802>
17. Rui Pan. Fatigue Performance Evaluation of Warm-Mixed Rubber Asphalt Mixture for Stress Absorption Layer in Cold Area. *Buildings*. 2024;14(12):3817. <https://doi.org/10.3390/buildings14123817>
18. Ashraf A, Sophian A, Bawono AA. Crack Detection, Classification, and Segmentation on Road Pavement Material Using Multi-Scale Feature Aggregation and Transformer-Based Attention Mechanisms. *Construction Materials*. 2024;4(4):655–675. <https://doi.org/10.3390/constrmater4040036>
19. Bhattacharya S, Taylor R, D’Melo D, Campbell C. Sustainable Design of Pavements: Predicting Pavement Service Life. *Infrastructures*. 2024;9(9):165. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9090165>
20. Zhen Liu, Bingyan Cui, Qifeng Yang, Xingyu Gu. Sensor-Based Structural Health Monitoring of Asphalt Pavements with Semi-Rigid Bases Combining Accelerated Pavement Testing and a Falling Weight Deflectometer Test. *Sensors*. 2024;24(3):994. <https://doi.org/10.3390/s24030994>
21. Asres E, Ghebrab T, Ekwaro-Osire S. Framework for Design of Sustainable Flexible Pavement. *Infrastructures*. 2022;7(1):6. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7010006>
22. Chun-Hua Hsing, Jun-Han Siao, Yu-Min Wang. A Study on the Design Depth of Permeable Road Pavement through Dynamic Load Experiment. *Materials*. 2022;15(13):4391. <https://doi.org/10.3390/ma15134391>
23. Kryukov KM. Assessing the Benefits and Challenges of Implementing 4D Modeling in Construction. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(2):75–84. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-75-84>
24. Al-Zgul IKh, Sheina SG, Morozova NE. Problems and Prospects of Risk-Oriented Management in Construction: A Review of Current Research. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(3):65–76. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-3-65-76>
25. Tiraturyan AN. Backcalculation of Elastic Moduli for Layered Media Based on Dynamic Deformation Analysis (Example of Highways). *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2024;60(8):947–954. <https://doi.org/10.1134/S1061830924602010>
26. Xuefeng Ye, Na Yang, Huina Chen, Manman Yang, Tingyao Wu. Damage Identification and Safety Threshold During the Construction and Operation Phases of Cast-in-Place Continuous Rigid Frame Bridges. *Buildings*. 2025;15(18):3282. <https://doi.org/10.3390/buildings15183282>
27. Babeshko VA, Evdokimova OV, Babeshko OM, Zaretskaia MV, Gorshkova EM, Mukhin AS, et al. On the Behavior of Materials with Defective Coating under Different Contact Conditions. *Materials Physics and Mechanics*. 2018;36(1):67–75. https://doi.org/10.18720/MPM.3612018_7
28. Lyapin A, Beskopylny A, Meskhi B. Structural Monitoring of Underground Structures in Multi-Layer Media by Dynamic Methods. *Sensors*. 2020;20(18):5241. <https://doi.org/10.3390/s20185241>
29. Tiraturyan AN, Uglova EV, Nikolenko DA, Nikolenko MA. Model for Determining the Elastic Moduli of Road Pavement Layers. *Magazine of Civil Engineering*. 2021;103(3):10308. <https://doi.org/10.34910/MCE.103.8>
30. Zhen Liu, Bingyan Cui, Qifeng Yang, Xingyu Gu. Sensor-Based Structural Health Monitoring of Asphalt Pavements with Semi-Rigid Bases Combining Accelerated Pavement Testing and a Falling Weight Deflectometer Test. *Sensors*. 2024;24(3):994. <https://doi.org/10.3390/s24030994>
31. Tutka P, Nagórski R, Złotowska M. The Impact of Dynamic Effects on the Results of Non-Destructive Falling Weight Deflectometer Testing. *Materials*. 2024;17(17):4412. <https://doi.org/10.3390/ma17174412>
32. Xia Hua, Wael Zatar, Xiangle Cheng, Gang S Chen, Yini She, Xiaotian Xu, et al. Modeling and Characterization of Complex Dynamical Properties of Railway Ballast. *Applied Sciences*. 2024;14(23):11224. <https://doi.org/10.3390/app142311224>
33. Meng Wang, Qunding Yu, Yuanjie Xiao, Wengi Li. Resilient Modulus Behavior and Prediction Models of Unbound Permeable Aggregate Base Materials Derived from Tunneling Rock Wastes. *Materials*. 2022;15(17):6005. <https://doi.org/10.3390/ma15176005>
34. Fang Wang, Shiyi Zhang, Muiyang Huang, Kai Liu, Chaoliang Fu. Assessment of Fatigue Life in Grouted Polyurethane Composites for Pavement Maintenance. *Materials*. 2025;18(8):1806. <https://doi.org/10.3390/ma18081806>
35. Gensheng Hu, Gongzuo Shi, Runhua Zhang, Jianfeng Chen, Haichang Wang, Junzhe Wang. Assessment of Intelligent Unmanned Maintenance Construction for Asphalt Pavement Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation and Analytical Hierarchy Process. *Buildings*. 2024;14(4):1112. <https://doi.org/10.3390/buildings14041112>
36. Piechowicz K, Szymanek S, Kowalski J, Lendo-Siwicka M. Stabilization of Loose Soils as Part of Sustainable Development of Road Infrastructure. *Sustainability*. 2024;16(9):3592. <https://doi.org/10.3390/su16093592>

37. Muhudin AA, Zami MS, Budaiwi IM, Abd El Fattah A. Experimental Study of Thermal Conductivity in Soil Stabilization for Sustainable Construction Applications. *Sustainability*. 2024;16(3):946. <https://doi.org/10.3390/su16030946>
38. Petrillo A, Fraternali F, Acampora A, Di Chiara G, Colangelo F, Farina I. Innovative Solidification and Stabilization Techniques Using Industrial By-Products for Soil Remediation. *Applied Sciences*. 2025;15(7):4002. <https://doi.org/10.3390/app15074002>
39. Jiacheng Cai, Yingchao Luo, Bing Zhang, Lei Chen, Lu Liu. Method for Extracting Impact Signals in Falling Weight Deflectometer Calibration Based on Frequency Filtering and Gradient Detection. *Sensors*. 2025;25(11):3317. <https://doi.org/10.3390/s25113317>
40. Kuttah D. Using Repeated Light-Weight Deflectometer Test Data to Predict Flexible Pavement Responses Based on the Mechanistic–Empirical Design Method. *Construction Materials*. 2024;4(1):216–237. <https://doi.org/10.3390/constrmater4010012>
41. Ni Guangcong, Tiraturyan AN, Uglova EV, Vorobev AV. Study on Dynamic Response Characteristics of Different Asphalt Pavement Structures Based on ALF Test. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):241–256. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-241-256>
42. Elshamy MM, Tiraturyan AN, Uglova EV. Evaluation of the Elastic Modulus of Pavement Layers Using Different Types of Neural Networks Models. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2021;21(4):364–375. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-364-375>

Об авторе:

Артем Николаевич Тиратурян, доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобильные дороги» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), Ttiraturjan@list.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Artem N. Tiraturyan, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Motorways Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), Ttiraturjan@list.ru

Conflict of Interest Statement: the author declares no conflict of interest.

The author has read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 13.09.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 19.10.2025

Принята к публикации / Accepted 06.11.2025