РЕМОНТ И СОДЕРЖАНИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Научная статья

УДК 625.7/.8
EDN: OQJJBP

ВАЛИДАЦИЯ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ СЛОЕВ МНОГОСЛОЙНОЙ МОДЕЛИ ДОРОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ПОМОЩИ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ В СЛОЯХ ОСНОВАНИЯ ИЗ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Виктор Александрович Думенко[1,2]✉
Андрей Владимирович Корочкин[2]
Александр Сергеевич Конорев[3]
Евгений Александрович Еременко[4]

[1,3,4] ФАУ «РОСДОРНИИ», Москва, Россия
[2] Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия
[1]dumenko@rosdornii.ru✉

Аннотация: *Рассмотрены вопросы проявления нелинейных свойств несвязных зернистых материалов. В целях описания работы несвязных материалов в конструкции дорожной одежды были проведены испытания установкой динамического нагружения конструкции, устроенной в секции для ускоренных испытаний дорожных одежд. В конструкцию при ее устройстве были заложены датчики различного типа. В их числе были датчики вертикального давления, устроенные в слое основания, а также на поверхности рабочего слоя грунта земляного полотна. При помощи установки динамического нагружения авторами были определены параметры чаши упругого прогиба поверхности покрытия дорожной одежды. Данные параметры в соответствии с действующими требованиями были применены для вычисления модулей упругости слоев дорожных одежд методом обратного расчета в программе, реализующей решение теории упругости для многослойного полупространства. Результаты численной модели были сопоставлены с данными, полученными от датчиков, размещенных в конструктивных слоях дорожной одежды во время проведения полевых измерений. На*

основе сравнения значения измерений, выявлена разница до 34 %, что дополнительно подтверждает необходимость учета нелинейных свойств несвязных зернистых материалов при проектировании нежестких дорожных одежд.

Ключевые слова: *дорожная одежда, долговечность, оценка прочности, напряженно-деформированное состояние, модуль упругости, несвязные зернистые материалы, нелинейность, обратный расчет, уровень надежности, чаша упругого прогиба.*

Благодарности: Работа в данной постановке была осуществлена при использовании результатов проведения мониторинга напряженно-деформированного состояния дорожной одежды на полигоне ФАУ «РОСДОРНИИ», предназначенного для испытаний симулятором колесной нагрузки «Циклос».

Для цитирования: Думенко В.А., Корочкин А.В., Конорев А.С., Еременко Е.А. Валидация модулей упругости слоев многослойной модели дорожной конструкции при помощи датчиков давления в слоях основания из зернистых материалов // Дороги и мосты. 2024. № 52/2. С. 213-230.

ROAD REPAIR AND MAINTENANCE

Original article

VALIDATION OF ELASTIC MODULI OF LAYERS OF A MULTILAYER MODEL OF A ROAD STRUCTURE BY MEANS OF PRESSURE SENSORS IN BASE LAYERS OF GRANULAR MATERIALS

Victor A. Dumenko[1,2]✉
Andrey V. Korochkin[2]
Alexander S. Konorev[1]
Evgeny A. Eremenko[1]

[1] FAI «ROSDORNII», Moscow, Russia
[2] Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI), Moscow, Russia
[1]dumenko@rosdornii.ru✉

***Abstract**: The issues of the manifestation of nonlinear properties of unbound granular materials are considered. In order to describe the operation of unbound materials in the road pavement construction, the tests were carried out with the dynamic loading unit of the structure arranged in the section for accelerated pavement testing. Sensors of various types were incorporated into the structure when it was installed. These included vertical pressure sensors installed in the base layer as well as on the surface of the working layer of the subgrade soil. Using a dynamic loading unit, the authors determined the parameters of the elastic deflection bowl of the pavement surface. These parameters, in accordance with the current requirements, were applied to calculate the elastic moduli of the pavement layers by the back calculation method in the program implementing the solution of the elasticity theory for a multilayer half-space. The results of the numerical model were compared with the data obtained from sensors placed in the structural pavement layers during field measurements. On the basis of comparison of the measurement values, a difference of up to 34 % was found, which additionally confirms the necessity to take into account the nonlinear properties of non-cohesive granular materials in the design of non-rigid pavements.*

***Keywords:** road pavement, durability, assessment of the strength, stress-strain state, resilient modulus, unbound granular material, nonlinearity, back-calculation, reliability level, bowl of elastic deflection.*

For citation: Dumenko V.A., Korochkin A.V., Konorev A.S., Eremenko E.A. Validation of elastic moduli of layers of a multilayer model of a road structure by means of pressure sensors in base layers of granular materials // Roads and Bridges. 2024; (52/2): 213-230. (In Russ.).

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в области дорожного хозяйства проводятся работы по совершенствованию методической базы в части нежестких дорожных одежд по многим направлениям исследований.

Ключевым аспектом повышения точности проектирования дорожных конструкций является более подробный расчет, который учитывает нелинейные и неупругие характеристики

использованных материалов. Это обусловлено тем, что действующий подход к проектированию часто основывается на линейно-упругом поведении материалов, что может приводить к недооценке их свойств. Слои из несвязных зернистых материалов обладают сложными объемно-механическими характеристиками, изменяющимися в зависимости от условий эксплуатации, транспортной нагрузки и температурных колебаний, поведение которых может существенно отличаться от линейного. Игнорирование этих факторов в процессе проектирования может привести к преждевременному возникновению повреждений, дорожного покрытия. Ранее данный вопрос был описан авторами в публикациях **[1-3]**, посвященных проектированию нежестких дорожных одежд с учетом нелинейных свойств несвязных зернистых материалов в основании. В одной из данных работ **[2]** для описания нелинейности применялись данные, подтверждающие неоднородность модуля упругости слоя основания по глубине. Модули упругости слоев дорожной одежды определялись методом обратного расчета в соответствии с ГОСТ 59918-2021 «Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Методики оценки прочности». При этом неоднородность модуля упругости по глубине слоя из несвязного зернистого материала сама по себе не является показателем нелинейности, а лишь служит одним из эффектов её проявления. Тем не менее, такое проявление нелинейности заслуживает особого внимания ввиду необходимости повышения точности расчета дорожных одежд на стадии проектирования. Рассмотрение материала при расчете лишь в линейно-упругой стадии приводит к неточностям **[4, 5]**.

В представленной работе также проведено определение модулей упругости методом обратного расчета при помощи программы, реализующей решение теории упругости. В целом, обратный расчет можно выполнять при помощи автоматизированных программ **[6-8]**. Кроме того, для этих целей применяются программы, реализующие метод конечных элементов, наряду с решениями теории упругости для многослойного полупространства **[9, 10]**.

В случае наличия значительного объема накопленных данных эмпирический подход может демонстрировать хорошую согласованность с результатами обратного расчета, выполненного с использованием итеративного процесса **[11]**. Кроме того, ведутся работы рядом исследователей по введению дополнительных

показателей, описывающих состояние дорожных одежд на основе параметров упругого прогиба **[12, 13].**

Однако для повышения маневренности решения в данной работе было решено сосредоточиться на итеративном расчете с использованием программы, анализирующей напряженно-деформированное состояние.

Методы исследования

В целях описания работы несвязных материалов в конструкции дорожной одежды были проведены испытания установкой динамического нагружения FWD-RDT дорожной конструкции, устроенной в секции[1] для ускоренных испытаний дорожных одежд **[14]**. В конструктивные слои дорожной одежды при ее устройстве были заложены датчики различного типа. В их числе были датчики давления, заложенные в слоях основания. Использовались датчики давления грунта с пределом измерения 2 МПа, изготовленные из нержавеющей стали, с наружным диаметром корпуса 200 мм, откалиброванные тензометром постоянного напряжения. Такие датчики сконструированы по принципу датчика силы и обладают высокой стойкостью к боковому давлению. Их особенностью является высокая чувствительность и точность измерения, нелинейность которых не превышает 1 %.

Первый датчик был уложен на поверхность рабочего слоя грунта земляного полотна перед дополнительным слоем из песка на глубину 97 см **(рис. 1)**, второй – в слой несущего основания из щебня на глубину 39 см **(рис. 2)**.

Датчики давления обеспечивают получение данных о значениях давления в слоях дорожных одежд посредством изменения электрического сигнала при воздействии нагрузки. Давление воспринимается чувствительной мембраной, передается на чувствительный тензоэлемент, который преобразует давление в электрический сигнал. Внешний вид датчика давления представлен на **рис. 3**.

[1] Патент № 2784647 C1 Российская Федерация, МПК G01M 17/02, E01C 23/07, G01M 7/06. Способ ускоренного испытания дорожных конструкций: № 2021134121: заявл. 23.11.2021: опубл. 29.11.2022 / С.А. Мирончук, А.С. Конорев, В.А. Думенко [и др.]; заявитель ФАУ «Российский дорожный научно-исследовательский институт». – EDN: IOZBJY.

Рис. 1. Заложение датчика давления

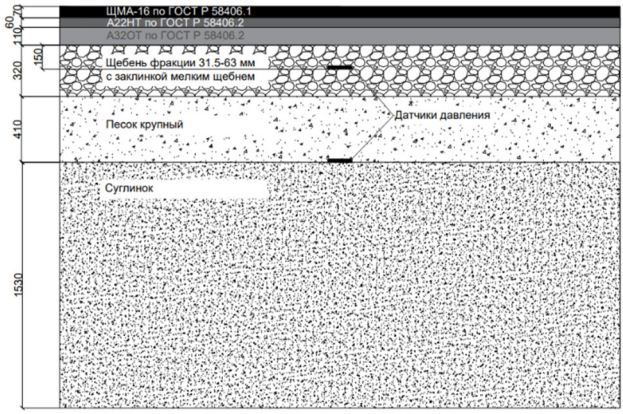

Рис. 2. Схема расположения датчиков давления в дорожной одежде

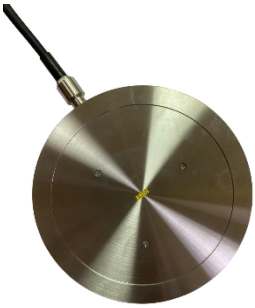

Рис. 3. Общий вид датчика давления

При помощи установки динамического нагружения FWD-RDT, изображенной на **рис. 4**, были определены параметры чаши упругого прогиба поверхности покрытия дорожной одежды.

Получение данных осуществляется при помощи специальных датчиков. Два датчика (акселерометр и геофон) располагаются в штампе, который передает нагрузку от падающего груза на покрытие. Остальные измерители расположены на измерительной балке в стороне от центра нагружения.

Рис. 4. Общий вид испытательной секции в ходе измерений

При приложении нагрузки, соответствующей расчетной нагрузке на ось 115 кН, авторами были получены параметры чаши упругого прогиба, приведенные в **табл. 1**. Установка динамического нагружения обеспечивает продолжительность воздействия нагрузки на поверхность дорожной одежды в соответствии с ГОСТ Р 59918-2021, равной 0,02-0,03 с. При этом погрешность измерения прогибов не превышает 0,01 мм.

Таблица 1

Параметры чаши упругого прогиба

Расстояние от центра нагружения, мм	*Параметры чаши упругого прогиба, мм*
0	0,293
300	0,217
450	0,178
600	0,15
900	0,101
1200	0,071
1500	0,051
1800	0,039

Устроенная в секции конструкция соответствует дорожной одежде для автомобильной дороги I технической категории. Общая толщина дорожной одежды составляет 97 см. Толщина слоя грунта земляного полотна – 153 см при глубине секции 2,5 м.

В целях валидации модулей упругости слоев модели дорожной одежды, построенной в программе, реализующей решение теории упругости для многослойного полупространства по решению А.К. Приварникова **[15]**, требуется провести вычисления модулей упругости слоев дорожной одежды обратным способом в соответствии с требованиями ГОСТ Р 59918-2021. Первоначально были внесены исходные данные по упругим характеристикам слоев дорожной конструкции для модели **(табл. 2)**.

Затем в итеративном порядке проводился расчет модулей упругости до тех пор, пока отклонение расчетной чаши от полученной установкой динамического нагружения не оказалось в пределах +/-5 %. После этого в финальной версии модели были заданы искомыми точки с координатами расположения датчиков давления.

Результаты

По результатам первых итераций обратного расчета было установлено, что определить модули упругости слоев при использовании исходного числа слоев с хорошим совпадением расчетных значений параметров чаши прогиба и показаний установки динамического нагружения было невозможно. Поэтому потребовалось разделить слои основания из щебня и песка на примерно равные по толщине подслои. После повышения числа подслоев, на которые были дополнительно разбиты слои из щебня и песка, расчет был выполнен.

В полученной по результатам обратного расчета модели, помимо расчетных точек на поверхности покрытия, которые требовались для определения модулей упругости, были заданы точки, соответствующие положению датчиков, при помощи которых были получены опытные данные. Результаты обратного расчета представлены в **табл. 3**.

Таблица 2

Параметры дорожной конструкции для моделирования

Расчетные параметры конструк-ции	*Элемент модели*						
	Слои покрытия		*Слои основания*			*Грунт земляного полотна*	*Секция*
	ЩМА-16 по ГОСТ Р58406.1	А22НТ по ГОСТ Р58406.2	А32ОТ по ГОСТ Р58406.2	Щебень фракции 31,5-63 мм с заклинкой мелким щебнем	Песок крупный	Суглинок	Армиро-ванный бетон В25
Толщина h, м	0,07	0,06	0,11	0,32	0,41	1,53	0,4
Модуль упругости E, МПа	3800	4150	3250	350	120	65	30000

Таблица 3

Результаты обратного расчета модулей упругости слоев

№ слоя	Толщина h, см	Модуль упругости E, МПа	Коэффициент Пуассона ν
1	7	8000	0,35
2	6	2900	0,35
3	11	1800	0,35
4	8	350	0,27
5	8	310	0,27
6	8	280	0,27
7	8	230	0,27
8	11	200	0,30
9	10	170	0,30
10	10	150	0,30
11	10	120	0,30
12	153	73	0,30
ПП	∞	30000	0,20

Полученные параметры напряженно-деформированного состояния в расчетных точках приведены в **табл. 4**. При проведении расчетов были выведены параметры местоположения расчетных точек, а также напряжения по вертикальной оси и вертикальные перемещения.

Установленные значения перемещений показали отклонения от показаний геофонов, установленных в штампе и на измерительной балке установки динамического нагружения, от точки к точке в диапазоне от -4,87 % до 4,88 %, что является хорошим показателем соответствия расчетной модели тому, что было зафиксировано на реальной конструкции.

При этом нормальные напряжения σ_z в расчетной точке в слое из щебня составил 60,76 кПа, а в слое из песка – 12,48 кПа. Фактические значения напряжений, соответствующие показаниям датчиков давления, в момент нагружения установкой динамического нагружения составили 96 и 12 кПа соответственно.

Таблица 4

Параметры напряженно-деформированного состояния

№ точки	№ слоя	Расстояние от центра приложения нагрузки r, см	Расстояние от верха слоя z, см	Нормальное напряжение σ_z, МПа	Перемещения u_z, см
1	1	0	0	0,821	-0,03073
2	1	30	0	0	-0,02104
3	1	45	0	0	-0,01777
4	1	60	0	0	-0,01481
5	1	90	0	0	-0,01041
6	1	120	0	0	-0,00744
7	1	150	0	0	-0,00529
8	1	180	0	0	-0,00371
9	5	0	5	0,060759	-0,02348
10	11	0	8	0,012482	-0,0147

Обсуждение

Результаты сопоставления данных, полученных при помощи датчиков давления, с результатами расчета нормальных напряжений в точках, соответствующих положению заложенных датчиков, показали, что расчетное давление в подошве слоя из песка совпадает с экспериментальным значением. Однако нормальное напряжение в расчетной точке в слое из щебня отличается от показаний датчика давления на 36 % в меньшую сторону. Следует сделать вывод о том, что расчетная модель недостаточно учитывает возникающие в реальности напряжения в слое из щебня. Более того, если принять модуль упругости постоянным по глубине в слоях основания из несвязных материалов, то расчетное напряжение примет значение на 67 % ниже фактического, что свидетельствует о том, что в данный момент при проектировании принимается во внимание лишь малая часть напряжений, которые сказываются на несущей способности несвязного зернистого материала в процессе эксплуатации. Первым шагом к повышению точности расчетов при проектировании с учетом нелинейных

свойств несвязных зернистых материалов авторы считают переход к программам, реализующим решение теории упругости для многослойного полупространства. Применение программы значительно повышает точность расчета дорожных одежд благодаря переходу от двухслойной к многослойной модели.

Кроме того, программа позволяет увеличивать количество расчетных слоев, что, как показано в данной статье, лучше соответствует реальному напряженно-деформированному состоянию дорожной одежды.

В продолжение данного исследования необходимо применять модели, описывающие нелинейное поведение зернистых сред **[1]**, при решении задач в программах, реализующих метод конечных элементов.

Заключение

Описанная в данной статье работа обусловлена валидацией модулей упругости слоев расчетной модели дорожной одежды благодаря показаниям датчиков давления, заложенных в конструкцию при работе установки динамического нагружения. Зафиксированные установкой значения параметров чаши упругого прогиба позволили провести обратный расчет модулей упругости дорожной одежды, тем самым откалибровав расчетную модель. Расчетная модель, включавшая дифференциацию по подслоям слоев основания, показала на 36 % более низкое значение нормального напряжения относительно замеренных. При этом модель без учета дополнительной дифференциации показала на 67 % более низкие значения относительно показаний датчиков давления.

На основании изложенного выше можно сделать следующие выводы:

– определение модулей упругости слоев основания дорожных одежд на основе параметров чаши упругого прогиба при анализе работы несвязного зернистого материала подтверждает проявление нелинейности, так как имело место уменьшение модуля упругости по глубине слоя основания;

– модуль упругости несвязных зернистых материалов (щебня и песка) варьируется по глубине слоя, причем значения в подошве на 34 и 40 % соответственно ниже, чем в верхней части слоя;

– недостаточный учет нелинейных свойств несвязных зернистых материалов приводит к тому, что фактические напряжения в слое из щебня могут быть в 3 раза выше, чем это заложено расчетом, что приводит к непрогнозируемому ухудшению состояния слоя основания и возникновению деформаций, которые отражаются на покрытии в процессе эксплуатации автомобильной дороги;

– проектирование нежестких дорожных одежд с несвязными зернистыми материалами необходимо совершенствовать в части поиска физически обоснованных уравнений связи между напряжениями и деформациями зернистой среды, учитывающими нелинейное поведение материала.

© Думенко В.А., Корочкин А.В., Конорев А.С., Еременко Е.А., 2024

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Корочкин А.В. Анализ существующих моделей для описания зернистых материалов при решении задач методом конечных элементов / А.В. Корочкин, В.В. Рудакова, В.А. Думенко // Изыскания и проектирование дорог: сборник научных трудов по материалам конференции студенческого научного общества кафедры «Изыскания и проектирование дорог», Москва, 18 апреля 2023 года / Под общей редакцией П.И. Поспелова. – М.: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2023. – С. 36-48. – EDN: CSOCUQ.*
2. *Корочкин А.В. Расчёт нежёстких дорожных одежд с учётом особенностей слоя щебня при использовании решений теории упругости / А.В. Корочкин, В.А. Думенко // Изыскания и проектирование дорог: сборник научных трудов по материалам конференции студенческого научного общества кафедры «Изыскания и проектирование дорог», Москва, 18 апреля 2022 года. – М.: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2022. – С. 3-17. – EDN: XOZSFO.*
3. *Корочкин А.В. Определение свойств щебеночного основания при проектировании нежестких дорожных одежд / А.В. Корочкин, В.А. Думенко // Проектирование автомобильных дорог: сборник докладов 80-й Международной научно-методической и научно-исследовательской конференции*

МАДИ, Москва, 24–28 января 2022 года. – М.: ООО «А-проджект», 2022. – С. 78-88. – EDN: BVSSHT.

4. *Мерзликин А.Е. Продление сроков службы нежестких дорожных одежд при проектировании: тривиальные и нетривиальные способы / А.Е. Мерзликин, Я.Н. Корчажников // Дороги и мосты. – 2018. – № 1(39). – С. 105-117. – EDN: YXTZRZ.*
5. *Радовский Б.С. К чему приводят некоторые упрощения в методике расчета нежестких дорожных одежд по ОДН 218.046-01 / Б.С. Радовский, А.Е. Мерзликин // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2016. – № 3 (77). – С. 9-12. – EDN: WWYVBT.*
6. *Influence of Seed Layer Moduli on Backcalculation Procedure and on Overlay Design of Flexible Pavements / M. Rocha, G. Marques, R. Silva, G. Lana // Transportation Research Record. – 2022. – Vol. 2676, No. 5. – P. 341-357. – DOI: 10.1177/03611981211065753. – EDN SFJPCS.*
7. *Тиратурян А.Н. Совершенствование неразрушающего метода определения механических характеристик элементов многослойных конструкций на примере дорожных одежд / А.Н. Тиратурян, А.А. Ляпин, Е.В. Углова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 1. – С. 56-65. – DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.06. – EDN MKVTVT.*
8. *Тиратурян А.Н. Программный комплекс для «обратного» расчета динамических модулей упругости эксплуатируемых дорожных конструкций с учетом параметров воздействия установок нагружения дорожных одежд / А.Н. Тиратурян, Е.В. Углова // Интернет-журнал «Науковедение». – 2012. – № 3 (12). – С. 118. – EDN: PVVAIJ.*
9. *Sawangsuriya A. Deflection-Based Approach for Flexible Pavement Design in Thailand / A. Sawangsuriya, T. Svasdisant, P. Jitareekul // Infrastructures. – 2023. – Vol. 8, No. 7. – P. 116. – DOI: 10.3390/infrastructures8070116. – EDN: KRVCWY.*
10. *Gopalakrishnan K. Co-variance matrix adaptation evolution strategy for pavement backcalculation / K. Gopalakrishnan, A. Manik // Construction and Building Materials. – 2010. – Vol. 24, No. 11. – P. 2177-2187. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.040. – EDN: OEKFZB.*
11. *Tóth C. Development of a Road Pavement Structure Diagnostic Procedure Based on the Virtual Inertial Point Method / C. Tóth,*

P. Primusz // Coatings. – 2022. – Vol. 12, No. 12. – P. 1944. – DOI: 10.3390/coatings12121944. – EDN: EQZDGO.

12. *Structural health assessment of pavement sections in the southern central United States using FWD parameters / N.R. Bastola, M.I. Souliman, S. Dessouky, R. Daoud // Frontiers in Built Environment. – 2022. – Vol. 8. – P. 14. – DOI: 10.3389/fbuil.2022.1026469. – EDN: ZLAXCY.*
13. *A statistical approach for pavement layer moduli backcalculation as a function of traffic speed deflections / G.M. Mabrouk, E. Alrashydah, A. Masad [et al.] // Innovative Infrastructure Solutions. – 2022. – Vol. 7, No. 5. – P. 1-14. – DOI: 10.1007/s41062-022-00886-w. – EDN: ZTHOZH.*
14. *Дорожно-испытательный комплекс для проведения ускоренных испытаний дорожных одежд / А.С. Конорев, С.А. Мирончук, Е.А. Еременко, М.Н. Подгорнов // Дороги и мосты. – 2023. – № 2 (50). – С. 43-60. – EDN: OYOHMS.*
15. *Приварников А.К. Пространственная деформация многослойного основания. – В кн.: Устойчивость и прочность элементов конструкций. – Днепропетровск. – 1973. – С. 27-45.*

REFERENCES

1. *Korochkin A.V. Analiz sushchestvuyushchih modelej dlya opisaniya zernistyh materialov pri reshenii zadach metodom konechnyh elementov / A.V. Korochkin, V.V. Rudakova, V.A. Dumenko // Izyskaniya i proektirovanie dorog: sbornik nauchnyh trudov po materialam konferencii studencheskogo nauchnogo obshchestva kafedry «Izyskaniya i proektirovanie dorog», Moskva, 18 aprelya 2023 goda: Pod obshchej redakciej P.I. Pospelova. M.: Moskovskij avtomobil'no-dorozhnyj gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet (MADI), 2023; 36-48.*
2. *Korochkin A.V., Dumenko V.A. Raschyot nezhyostkih dorozhnyh odezhd s uchyotom osobennostej sloya shchebnya pri ispol'zovanii reshenij teorii uprugosti / A.V. Korochkin, V.A. Dumenko // Izyskaniya i proektirovanie dorog: sbornik nauchnyh trudov po materialam konferencii studencheskogo nauchnogo obshchestva kafedry «Izyskaniya i proektirovanie dorog», Moskva, 18 aprelya 2022 goda: Pod obshchej redakciej P.I.*

Pospelova. M.: Moskovskij avtomobil'no-dorozhnyj gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet (MADI), 2022, 3-17.

3. *Korochkin A.V. Opredelenie svojstv shchebenochnogo osnovaniya pri proektirovanii nezhestkih dorozhnyh odezhd / A.V. Korochkin, V.A. Dumenko: Proektirovanie avtomobil'nyh dorog: sbornik dokladov 80-j Mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoj i nauchno-issledovatel'skoj konferencii MADI, Moscow, January 24-28, 2022. M.: «A-project» LLC, 2022, 78-88.*
4. *Merzlikin A.E. Prodlenie srokov sluzhby nezhestkih dorozhnyh odezhd pri proektirovanii: trivial'nye i netrivial'nye sposoby. Dorogi i mosty, 2022, 1(39): 105-117 (In russ).*
5. *Radovsky B.S. K chemu privodyat nekotorye uproshcheniya v metodike rascheta nezhestkih dorozhnyh odezhd po ODN 218.046-01 / B.S. Radovsky, A.E. Merzlikin // Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli, 2016, № 3(77): 9-12.*
6. *Rocha M. Influence of Seed Layer Moduli on Backcalculation Procedure and on Overlay Design of Flexible Pavements / M. Rocha, G. Marques, R. Silva, G. Lana // Transportation Research Record. – 2022. – 2676(5):341-357. DOI:10.1177/ 03611981211065753.*
7. *Tiraturyan A.N. Sovershenstvovanie nerazrushayushchego metoda opredeleniya mekhanicheskih harakteristik elementov mnogoslojnyh konstrukcij na primere dorozhnyh odezhd / A.N. Tiraturyan, A.A. Lyapin, E.V. Uglova // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika, 2022, 1:56-65. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.06 (In russ).*
8. *Tiraturyan A.N. Programmnyj kompleks dlya \"obratnogo\" rascheta dinamicheskih modulej uprugosti ekspluatiruemyh dorozhnyh konstrukcij s uchetom parametrov vozdejstviya ustanovok nagruzheniya dorozhnyh odezhd / A.N. Tiraturyan, E.V. Uglova // Internet-zhurnal Naukovedenie, 2012, 3(12): 118 (In russ).*
9. *Sawangsuriya A. Deflection-Based Approach for Flexible Pavement Design in Thailand / A. Sawangsuriya, T. Svasdisant, P. Jitareekul // Infrastructures, 2023, 8(7): 116. DOI: 10.3390/infrastructures8070116.*
10. *Gopalakrishnan K. Co-variance matrix adaptation evolution strategy for pavement backcalculation / K. Gopalakrishnan, A. Manik // Construction and Building Materials, 2010, 24(11):2177-2187. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.040.*

11. *Tóth C. Development of a Road Pavement Structure Diagnostic Procedure Based on the Virtual Inertial Point Method / C. Tóth, P. Primusz // Coatings, 2022, 12(12): 1944. DOI: 10.3390/coatings12121944.*
12. *Bastola N.R. Souliman M.I., Dessouky S., Daoud R.: Structural health assessment of pavement sections in the southern central United States using FWD parameters / N.R. Bastola. M.I. Souliman, S. Dessouky, R. Daoud // Frontiers in Built Environment, 2022, 8: 14. DOI: 10.3389/fbuil.2022.1026469.*
13. *Mabrouk G.M. A statistical approach for pavement layer moduli backcalculation as a function of traffic speed deflections / G.M. Mabrouk, E. Alrashydah, A. Masad [et al.] // Innovative Infrastructure Solutions,2022, 7(5): 1-14. DOI: 10.1007/s41062-022-00886-w.*
14. *Konorev A.S. Dorozhno-ispytatel'nyj kompleks dlya provedeniya uskorennyh ispytanij dorozhnyh odezhd / A.S. Konorev, S.A. Mironchuk, E.A. Eremenko, M.N. Podgornov // Dorogi i mosty, 2023, 2(50): 43-60 (In russ).*
15. *Privarnikov A.K. Prostranstvennaya deformaciya mnogoslojnogo osnovaniya. Ustojchivost' i prochnost' elementov konstrukcij, Izd. Dnepropetrovsk. Univ., Dnepropetrovsk, 1973, 27-45 (In russ).*

Информация об авторах

В.А. Думенко – аспирант, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ); начальник отдела методического обеспечения сохранности автомобильных дорог, ФАУ «РОСДОРНИИ», Москва, Россия

А.В. Корочкин – кандидат технических наук, доцент, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

А.С. Конорев – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора Департамента научно-технического развития и стандартизации, ФАУ «РОСДОРНИИ», Москва, Россия

Е.А. Еременко – заместитель начальника Управления перспективных методов исследований и испытаний, ФАУ «РОСДОРНИИ», Москва, Россия

Information about the authors

V.A. Dumenko – Head of the Division of Methodological Support for the Highways Safety, FAI «ROSDORNII»; Postgraduate Student, Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Russia
A.V. Korochkin – Ph. D. (Tech.), Associate Professor, Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Russia
A.S. Konorev – Ph. D. (Tech.), Associate Professor, Deputy Director of the Department of Scientific and Technical Development and Standardization, FAI «ROSDORNII», Moscow, Russia
E.A. Eremenko – Deputy Head of the Division of Advanced Research and Testing Methods, FAI «ROSDORNII», Moscow, Russia

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Рецензент: канд. техн. наук А.М. Стрижевский (ФАУ «РОСДОРНИИ»).

Статья поступила в редакцию 08.10.2024. Одобрена после рецензирования 21.10.2024. Принята к публикации 23.10.2024.
The article was submitted 08.10.2024. Approved after reviewing 21.10.2024. Accepted for publication 23.10.2024.