
РЕМОНТ И СОДЕРЖАНИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Научная статья

УДК 625.855.3

DOI: 10.70991/1815-896X-2025-1-53-98-109

EDN: IBBAQE



ОБ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ КАМЕННОГО МАТЕРИАЛА
АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Николай Александрович Лушников¹

Петр Александрович Лушников^{2✉}

Глеб Алексеевич Понарин³

^{1,2,3}Российский дорожный научно-исследовательский институт
(ФАУ «РОСДОРНИИ»), Москва, Россия

¹Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия

¹lushnikov@rosdornii.ru

²P.lushnikov@rosdornii.ru✉

³PonarinGA@rosdornii.ru

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы, связанные со свойствами каменного материала, входящего в состав асфальтобетонной смеси, как одного из основных компонентов, определяющих износостойкость асфальтобетона. Одним из наиболее широко используемых каменных материалов является гранит. При периодическом воздействии шипов противоскольжения автомобильной шины на зерна гранитного щебня происходит постепенное накопление повреждений, приводящее к возникновению и развитию трещин, и в дальнейшем, отделению частиц гранита от зерна (отдельной щебенки), т.е. его износ. Предложена модель взаимодействия встроенного в автомобильную шину шипа противоскольжения с зерном гранитного щебня. С использованием методов линейной механики разрушения, путем преобразования выражения для коэффициента интенсивности напряжений, выведены соотношения между прочностью каменного материала и количеством циклов нагрузки на зерно гранитного щебня до разрушения. На основе полученных соотношений могут быть даны оценки, позволяю-

щие сравнивать износостойкость образцов гранитного щебня, имеющего различные характеристики.

Ключевые слова: износостойкость асфальтобетона, модуль сдвига, предел прочности, коэффициент интенсивности напряжений.

Для цитирования: Лушников Н.А., Лушников П.А., Понарин Г.А. Об износостойкости каменного материала асфальтобетонных покрытий // Дороги и мосты. – 2025. – № 53/1. – С. 98-109. DOI: 10.70991/1815-896X-2025-1-53-98-109.

ROAD REPAIR AND MAINTENANCE

Original article

ABOUT WEAR RESISTANCE OF STONE MATERIAL OF ASPHALT CONCRETE PAVEMENTS

Nikolay A. Lushnikov¹

Petr A. Lushnikov²✉

Gleb A. Ponarin³

^{1,2,3}Russian road Scientific Research Institute
(FAI «ROSDORNII»), Moscow, Russia

¹Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

¹lushnikov@rosdornii.ru

²P.lushnikov@rosdornii.ru✉

³PonarinGA@rosdornii.ru

Abstract. *The article deals with the issues related to the properties of stone material included in asphalt concrete mixture as one of the main components determining the wear resistance of asphalt concrete. One of the most widely used stone materials is granite. At periodic impact of antiskid tire spikes on grains of granite crushed stone there is a gradual accumulation of damage, leading to the emergence and development of cracks, and further, the separation of granite particles from the grain (separate rubble), i.e. its wear. The model of interaction of an antiskid spike built into an automobile tire with a granite crushed stone grain is offered. With the use of methods of linear mechanics of destruction, by transformation of expression for the coeffi-*

cient of intensity of stresses, ratios between strength of a stone material and quantity of cycles of loading on a grain of granite crushed stone before destruction are deduced. On the basis of the received ratios the estimations allowing to compare wear resistance of samples of granite crushed stone having different characteristics can be given.

Keywords: *asphalt concrete wear resistance, shear modulus, ultimate strength, stress intensity factor.*

For citation: Lushnikov N.A., Lushnikov P.A., Ponarin G.A.

About wear resistance of stone material of asphalt concrete pavements // Roads and Bridges. – 2025; (53/1): 98-109 (In Russ.). DOI: 10.70991/1815-896X-2025-1-53-98-109.

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение интенсивности движения транспортных потоков, осевых нагрузок, широкое использование ошипованных шин приводит к интенсивному износу дорожных покрытий с образованием на них колеиности. Наличие колеиности на дорожном покрытии ухудшает его ровность, снижает уровень безопасности дорожного движения, увеличивает финансовые затраты на работы по его ремонту и содержанию, а также приводит к ряду других негативных последствий. Для их преодоления может использоваться ряд мероприятий, в том числе, повышение износостойкости материалов, входящих в состав асфальтобетонной смеси. На территории Российской Федерации для устройства дорожных покрытий в основном используется асфальтобетон. Износостойкость асфальтобетона определяется его составом, технологией производства и укладки. В данной статье рассмотрены вопросы, связанные со свойствами каменного материала, входящего в состав асфальтобетонной смеси, как одного из основных компонентов, определяющих его износостойкость. Одним из наиболее широко используемых каменных материалов является гранит. Ниже рассмотрена модель взаимодействия встроенного в автомобильную шину шипа противоскольжения с зерном гранитного щебня, и на ее основе получено количественное соотношение, позволяющее сравнивать износостойкость гранитов с различными свойствами.

Методы и результаты

Типичный состав гранита – около 25-35 % кварца, 55-65 % полевого шпата, незначительного количества слюды и других включений (ГОСТ 34342-2017). В качестве примера на **рис. 1** показана фотография гранитного щебня, выполненная с 200-кратным увеличением.

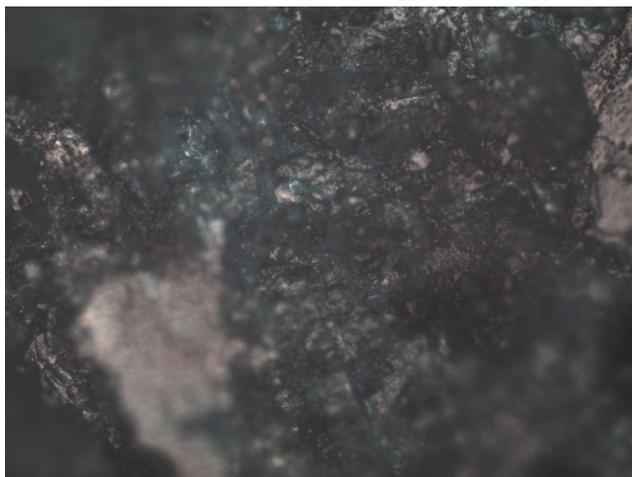


Рис. 1. Образец зерна гранитного щебня:
*светлые включения – кристаллы кварца;
остальной состав определяют кальциевые и натриевые
полевые шпаты с незначительным количеством
включений из других материалов*

Предел прочности на сжатие у кварца – приблизительно 1500-2000 МПа, у полевых шпатов, в зависимости от разновидности – 100-200 МПа, у слюды – около 1000 МПа. Поэтому гранитный щебень можно рассматривать как некоторую двухкомпонентную среду: менее прочный основной состав (одна из многочисленных разновидностей полевого шпата) и более прочные включения (кристаллы кварца). При периодическом воздействии шипов противоскольжения автомобильной шины на зерна щебня происходит постепенное накопление повреждений, приводящее к возникновению и развитию трещин [1, 2]. Такие трещины в первую очередь появляются на границах включений указанной двухкомпонентной среды [3, 4]. Процесс разрушения поверхностного слоя зерна гранита, т.е. его износ, представим в виде после-

довательного отделения частиц от зерна (их выкрашивания). Будем считать, что основная часть внешней энергии, затрачиваемой на износ, идет на отделение частиц более прочных кристаллов-включений. Тогда для сравнения износостойкости двух различных по составу и одинаковых по площади контакта зерен гранитного щебня можно использовать отношение:

$$m_1 N_1 / m_2 N_2 ,$$

где

m_1, m_2 – относительная площадь включений в первом и втором зерне (могут быть приближенно определены по фотографиям);

N_1, N_2 – количество циклов нагрузки (воздействий шипа) до отделения частиц включений.

Оценку количества циклов рассмотрим ниже.

Проанализируем две такие двухкомпонентные среды с различным по прочности основным составом, прочность включений (кристаллов кварца) будем предполагать одинаковой. Выделим в каждой среде по элементу, содержащему часть основного состава и одно включение. Оценим отношение числа циклов нагрузки под воздействием шипа противоскольжения до разрушения, т.е. отделения зафиксированного включения. Будем предполагать, что разрушение происходит, когда длина трещины на границе включения, возникновение и рост которой происходит в результате периодического воздействия шипа противоскольжения на включение, достигнет некоторого критического значения [5-7].

В состав гранита входят элементы, имеющие в основном кристаллическое строение, поэтому характер разрушения будем считать хрупким. Давление шипа противоскольжения при взаимодействии с гранитным щебнем, как правило, не превышает величины порядка 10-20 МПа, а предел прочности на сжатие у гранита – 100-200 МПа, поэтому величины напряжений, возникающих при взаимодействии шипа противоскольжения и включения, можно считать малыми по сравнению с пределом прочности. Рассмотренные предположения позволяют использовать методы линейной механики разрушения [7-15].

Для оценки числа циклов до разрушения, т.е. отделения зафиксированных включений, используем известное соотношение, полученное экспериментально (так называемый закон Париса [10]:

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^n, \quad (1)$$

где

N – число циклов нагрузки;

l – длина образовавшейся трещины;

C, n – экспериментальные константы;

$\Delta K = K_{max} - K_{min}$ – изменение коэффициента интенсивности напряжений при изменении нагрузки от максимальной до минимальной величины.

Из соотношения (1) получим:

$$N - N_0 = \int_{l_0}^l \frac{dl}{C(\Delta K)^n}, \quad (2)$$

где

l, l_0 – длины критической (до разрушения) и начальной трещин;

N, N_0 – число циклов до образования критической и начальной трещин.

Для коэффициента интенсивности напряжений (рис. 2) используем следующее выражение [13]:

$$K_{II} = \tau \cdot \sqrt{\pi l} \cdot \frac{(2\varepsilon \cdot \sin(\varepsilon \cdot \ln(2l)) + \cos(\varepsilon \cdot \ln(2l)))}{ch(\pi\varepsilon)} = \tau \cdot \sqrt{\pi l} \cdot f(l), \quad (3)$$

где

$$\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{G_2 k_1 + G_1}{G_1 k_2 + G_2} \right); \quad k_1 = \frac{3-\nu_1}{1+\nu_1}; \quad k_2 = \frac{3-\nu_2}{1+\nu_2};$$

ν_1, ν_2, G_1, G_2 – коэффициенты Пуассона и модули сдвига включений и основной среды.

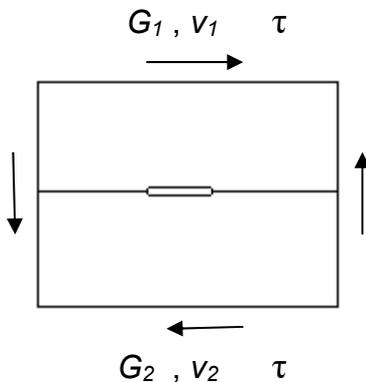


Рис. 2. Трещина на границе раздела двух сред

В **табл. 1** приведены значения некоторых параметров, характеризующих материалы элементов рассматриваемой двухкомпонентной среды.

Таблица 1

	<i>Модуль сдвига G, ГПа</i>	<i>Коэффициент Пуассона ν</i>
<i>Кварц (включения)</i>	30	0,08
<i>Полевой шпат (основная среда)</i>	10 – 25	0,21 – 0,29

Определим значения функции $f(l)$, входящей в формулу (3), для типичных параметров, приведенных в **табл. 2**.

Таблица 2

<i>G1, ГПа</i>	<i>G2, ГПа</i>	<i>ν1</i>	<i>ν2</i>	<i>k1</i>	<i>k2</i>	<i>ε</i>
10	30	0,25	0,08	2,2	2,7	0,046

В этом случае выражение для $f(l)$ примет вид:

$$f(l) = 0,091 \cdot \sin(0,046 \cdot \ln(2l)) + \cos(0,046 \cdot \ln(2l)) .$$

Включения имеют размер порядка 10^{-3} м, в пределах этого размера значение функции $f(l)$ приблизительно постоянно, например, при изменении l от 10^{-4} до 10^{-2} значения $f(l)$ меняются от 0,95 до 0,97, поэтому $f(l) \approx 1$, и соотношение (3) принимает вид:

$$K_{II} \cong \tau \cdot \sqrt{\pi l} , \Delta K \cong \Delta \tau \cdot \sqrt{\pi l} . \quad (4)$$

В формуле (2) параметр n , как правило [1, 2], находится в пределах $2 < n < 5$, поэтому, принимая $n = 3$ из (3), с учетом (4), получим:

$$N - N_0 = \frac{l_0}{C \cdot (\Delta \tau \cdot \sqrt{\pi l_0})^3} \cdot \left(1 - \left(\frac{l_0}{l} \right)^{0.5} \right) ,$$

где

l – критическая длина трещины, при которой происходит разрушение.

Учитывая равенство $N - N_0 = N \cdot (1 - N_0 / N)$ и пренебрегая величинами $N_0/N, l_0/l$, получим:

$$N \cong \frac{l_0}{C \cdot (\Delta\tau \cdot \sqrt{\pi l_0})^3} \quad (5)$$

Считая константу C , длину начальной трещины и материал включения (кварц) одинаковыми для двух различных зерен щебня, из (5) определим отношение числа циклов до разрушения (отделения включений) этих двух зерен:

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{\Delta\tau_2}{\Delta\tau_1} \right)^3 \quad (6)$$

Для определения разности касательных напряжений на границе включения и основной среды $\Delta\tau$ (рис. 3) используем следующее приближенное соотношение [1, 5, 7, 8]:

$$\Delta\tau \cong \frac{Ap}{G_2/G_1 \cdot \sigma_2/\sigma_1},$$

где

$G_1, G_2, \sigma_1, \sigma_2$ – модули сдвига и прочность на сжатие двух компонент среды;

A – константа;

p – величина давления шипа противоскольжения на поверхность включения.

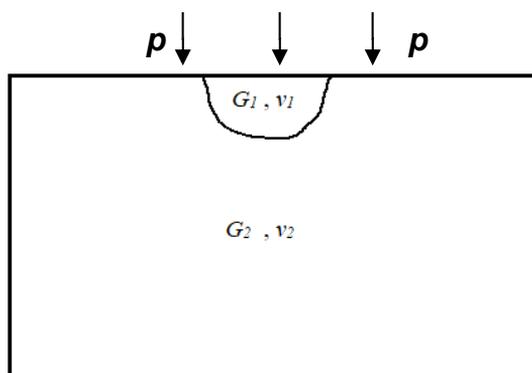


Рис. 3. Фрагмент двухкомпонентной среды с включением: p – давление шипа противоскольжения на поверхность включения; G – модуль сдвига; v – коэффициент Пуассона включения и основного состава

Тогда формула (6) примет вид:

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{G_1 \cdot \sigma_1}{G_2 \cdot \sigma_2} \right)^3, \quad (7)$$

где

$G_1, G_2, \sigma_1, \sigma_2$ – модули сдвига и прочность на сжатие двух различных материалов основного состава зерен щебня (полевого шпата); материал включения (кварц) считается одинаковым для обоих рассматриваемых зерен щебня.

Обсуждение

Следует отметить, что хотя возникновение трещин наиболее вероятно именно вдоль границы раздела двух компонент гранита с различными свойствами, тем не менее, трещины могут возникать и во вполне однородной среде. Однако в этом случае формула для коэффициента интенсивности напряжений [13-15] полностью аналогична (4) и все приведенные выше рассуждения сохраняют силу, т.е. формулу (7) можно использовать и в этом случае.

Для экспериментальной проверки и возможной модификации соотношения (7) (в частности, уточнения показателя степени $n = 3$) авторы планируют провести ряд испытаний различных образцов каменного материала асфальтобетона (см. также [16, 17]). С учетом полученных результатов предполагается рассмотреть вопрос о выводе аналогичного соотношения для асфальтобетона.

В данной работе рассмотрен лишь один из видов износа – контактно-усталостный, так как такой износ характерен для взаимодействия ошипованной шины с дорожным покрытием и вносит определяющий вклад в процесс колееобразования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, изложенное позволяет сделать следующие выводы:

1. Показано, что для изучения вопросов, связанных с износостойкостью каменного материала, входящего в состав асфальтобетонной смеси, может быть использована модель двухкомпонентной среды.

2. С применением указанной модели получено приближенное соотношение для сравнения износостойкости двух различных зерен гранитного щебня.

3. Требуется провести экспериментальную проверку полученного соотношения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Работнов Ю.Н. *Механика деформируемого твердого тела* / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1979. – 744 с.
2. Седов Л.И. *Механика сплошной среды* / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1984. – Т. 2. – 560 с.
3. Качанов Л.М. *Основы механики разрушения* / Л.М. Качанов. – М.: Наука, 1974. – 312 с.
4. Колесников Ю.В. *Механика контактного разрушения* / Ю.В. Колесников, Е.М. Морозов. – М.: Изд-во ЛКИ, 2012. – 224 с.
5. Нотт Дж.Ф. *Основы механики разрушения* / Дж.Ф. Нотт / Пер. с англ. Д.В. Лаптева; под ред. В.Г. Кудряшова. — М.: Металлургия, 1978. – 256 с.
6. Макклинок Ф.Э. *Деформация и разрушение материалов: пер. с англ.* / Ф.Э. Макклинок, А. Аргон / Под ред. канд. техн. наук Е.М. Морозова и канд. физ.-мат. наук Б.М. Струнина. – М.: Мир, 1970. – 443 с.
7. Черепанов Г.П. *Механика хрупкого разрушения* / Г.П. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
8. Эрдоган Ф. *Теория распространения трещин* / Ф. Эрдоган. – В кн.: *Разрушение [в 7 т.]*; пер. с англ. А.С. Вавакина [и др.]; под ред. Г. Либовиц. – М.: Мир, 1975. – Т. 2. – С. 521-615.
9. Си Дж. *Математическая теория хрупкого разрушения* / Дж. Си, Г. Либовиц. – В кн.: *Разрушение [в 7 т.]*; пер. с англ. А.С. Вавакина [и др.]; под ред. Г. Либовиц. – М.: Мир, 1975. – Т. 2. – С. 83-203.
10. Парис П. *Анализ напряженного состояния около трещин* / П. Парис, Дж. Си. – В кн.: *Прикладные вопросы вязкости разрушения*. – М.: Мир, 1968. – С. 64-142.
11. Морозов Н.Ф. *Математические вопросы механики трещин* / Н.Ф. Морозов. – М.: Наука, 1984. – 256 с.
12. Слепян Л.И. *Механика трещин* / Л.И. Слепян. – Л.: Судостроение, 1981. – 295 с.
13. *Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2 т.* / [Ито Ю. и др.]; под ред. Ю. Мураками; пер. с англ; под ред. Р.В. Гольдштейна, Н.А. Махутова. – М.: Мир, 1990. – Т. 2. – 566 с.
14. *Механика разрушения и прочность материалов: справ. пособие в 4 т.* – Под общ. ред. Панасюка В.В. – Киев: Наукова думка, 1988. – Т. 2. – 619 с.
15. Tada H. *The stress analysis of cracks* / H. Tada, P. Paris, G. Irwin. – Handbook. – 1973. – 385 p.
16. N. Lushnikov. *Dynamics of rutting because of road surface wear* / N. Lushnikov, P. Lushnikov, D. Nebratenko, V. Nikolaevsky: статья в сборнике трудов конференции. – *International Scientific and Practical Symposium «The Future of The Construction Industry: Challenges and Development Prospects» (FCI-2023)*. – Москва, 18-22 сентября 2023 г. – Т. 457. – Les Ulis, 2023. – С. 01012.
17. Васильев Ю.Э. *Взаимодействие шипованных шин с дорожным покрытием* / Ю.Э. Васильев, Г.А. Понарин // *Строительные материалы*. – 2016. – № 12. – С. 60-63.

REFERENCES

1. Rabotnov Yu.N. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* / Yu.N. Rabotnov. – M.: Nauka, 1979. – 744 s.
2. Sedov L.I. *Mekhanika sploshnoj sredy* / L.I. Sedov. – M.: Nauka, 1984. – T. 2. – 560 s.
3. Kachanov L.M. *Osnovy mekhaniki razrusheniya* / L.M. Kachanov. – M.: Nauka, 1974. – 312 s.
4. Kolesnikov Yu.V. *Mekhanika kontaktnogo razrusheniya* / Yu.V. Kolesnikov, E.M. Morozov. – M.: Izd-vo LKI, 2012. – 224 s.
5. Nott Dzh.F. *Osnovy mekhaniki razrusheniya* / Dzh.F. Nott / Per. s angl. D.V. Lapteva; pod red. V.G. Kudryashova. – M.: Metallurgiya, 1978. – 256 s.
6. Maklinok F.E. *Deformatsiya i razrushenie materialov: per. s angl. / F.E. Maklinok, A. Argon / Pod red. kand. tekhn. nauk E.M. Morozova i kand. fiz.-mat. nauk B.M. Strunina.* – M.: Mir, 1970. – 443 s.
7. Cherepanov G.P. *Mekhanika hrupkogo razrusheniya* / G.P. Cherepanov. – M.: Nauka, 1974. – 640 s.
8. Erdogan F. *Teoriya rasprostraneniya treshchin* / F. Erdogan. – V kn.: *Razrushenie [v 7 t.]: per. s angl. A.S. Vavakina [i dr.]; pod red. G. Libovic.* – M.: Mir, 1975. – T. 2. – S. 521-615.
9. Si Dzh. *Matematicheskaya teoriya hrupkogo razrusheniya* / Dzh. Si, G. Libovic. – V kn.: *Razrushenie [v 7 t.]: per. s angl. A.S. Vavakina [i dr.]; pod red. G. Libovic.* – M.: Mir, 1975. – T. 2. – S. 83-203.
10. Paris P. *Analiz napryazhennogo sostoyaniya okolo treshchin* / P. Paris, Dzh. Si. – V kn.: *Prikladnye voprosy vyazkosti razrusheniya.* – M.: Mir, 1968. – S. 64-142.
11. Morozov N.F. *Matematicheskie voprosy mekhaniki treshchin* / N.F. Morozov. – M.: Nauka, 1984. – 256 s.
12. Slepyan L.I. *Mekhanika treshchin* / L.I. Slepyan. – L.: Sudostroenie, 1981. – 295 s.
13. *Spravochnik po koeffitsientam intensivnosti napryazhenij: V 2 t. / [Ito Yu. i dr.]; pod red. Yu. Murakami; per. s angl; pod red. R.V. Gol'dshtejna, N.A. Mahutova.* – M.: Mir, 1990. – T. 2. – 566 s.
14. *Mekhanika razrusheniya i prochnost' materialov: sprav. posobie v 4 t. – Pod obshch. red. Panasyuka V.V. – Kiev: Naukova dumka, 1988. – T. 2. – 619 s.*
15. Tada H. *The stress analysis of cracks* / H. Tada, P. Paris, G. Irwin. – Handbook. – 1973. – 385 p.
16. N. Lushnikov. *Dynamics of rutting because of road surface wear* / N. Lushnikov, P. Lushnikov, D. Nebratenko, V. Nikolaevsky: *stat'ya v sbornike trudov konferencii. – International Scientific and Practical Symposium «The Future of The Construction Industry: Challenges and Development Prospects» (FCI-2023).* – Moskva, 18-22 sentyabrya 2023 g. – T. 457. – Les Ulis, 2023. – S. 01012.
17. Vasil'ev Yu.E. *Vzaimodejstvie shipovannyh shin s dorozhnym pokrytiem* / Yu.E. Vasil'ev, G.A. Ponarin // *Stroitel'nye materialy.* – 2016. – № 12. – S. 60-63.

Информация об авторах

Н.А. Лушников – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автомобильные дороги, аэродромы, основания и фундаменты», Российский университет транспорта (МИИТ); заместитель начальника отдела производственно-технического оснащения ФАУ «РОСДОРНИИ», Москва, Россия

П.А. Лушников – кандидат технических наук, начальник отдела производственно-технического оснащения, ФАУ «РОСДОРНИИ», Москва, Россия

Г.А. Понарин – инженер, начальник управления эксплуатации и дорожных исследований, ФАУ «РОСДОРНИИ», Москва, Россия

Information about the authors

N.A. Lushnikov – Ph. D. (Tech.), Associate Professor, Head of the Chair «Automobile Roads, Aerodromes, Bases and Foundations», Russian University of Transport (MIIT), Deputy Head of Production and Technical Equipment Section, FAI «ROSDORNII», Moscow, Russia

P.A. Lushnikov – Ph. D. (Tech.), Head of Production and Technical Equipment Section, FAI «ROSDORNII», Moscow, Russia

G.A. Ponarin – Engineer, Head of Operation and Road Research Division, 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.

Рецензенты: канд. техн. наук, главный специалист отдела эксплуатации и методологического обеспечения дорожной лаборатории А.М. Стрижевский; канд. техн. наук, начальник управления перспективных методов исследований и испытаний С.А. Мирончук (ФАУ «РОСДОРНИИ»).

Статья поступила в редакцию 03.02.2025. Одобрена после рецензирования 11.03.2025. Принята к публикации 24.04.2025.

The article was submitted 03.02.2025. Approved after reviewing 11.03.2025. Accepted for publication 24.04.2025.