

## Транспортные системы Transport systems

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.0

doi: 10.30987/2782-5957-2026-2-42-49

### ВЛИЯНИЕ НЕРОВНОСТЕЙ ДОРОГ НА ИЗМЕНЕНИЕ КИНЕМАТИКИ ДВИЖЕНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО КОЛЕСА

Любовь Александровна Сладкова<sup>1✉</sup>, Андрей Сергеевич Кириленков<sup>2</sup>, Владислав Владимирович Филатчев<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия

<sup>1</sup> rich.cat2012@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6786-0386>

<sup>2</sup> kirilenkovas@mail.ru

<sup>3</sup> arokosidas@yandex.ru

#### Аннотация

Неровности на дорогах являются одной из основных причин дорожно-транспортных происшествий. Из практического опыта водителей известно, что чаще всего аварии происходят в момент выхода транспортного средства из выбоины из-за сложностей, связанных с рулевым управлением. Абсолютно плоских поверхностей на дорогах и местности нет, а неровность может располагаться также поперек или под острым углом к направлению движения, превышая в некоторых случаях допустимые нормативами параметры. Практика эксплуатации показала, что микропрофиль дороги влияет на изменение направления движения машины в плане. Если машина движется по прямолинейной траектории, то наличие неровностей ведет к тому, что такого движения в профиле может представлять собой кривую.

**Цель работы.** Исследовать влияние микропрофиля дорог на изменение кинематики движения пневматического колеса транспортного средства.

**Задача.** Использование результатов исследований для разработки устройств стабилизации движения транспортного средства с учетом изменения профиля дороги.

**Методы исследования** основаны на положениях взаимодействия пневмоколесного движителя с поверхностью дороги и основных положениях теоретической механики.

**Новизна работы.** Получены теоретические зависимости, позволяющие оценить качественно и количественно изменение скорости перемещения колеса при встрече с пороговым препятствием.

**Результаты исследования.** С учетом полученных результатов исследований возможно проведение мониторинга изменения коэффициента буксования колес, а также создания устройства стабилизации движения транспортного средства по пересеченной местности.

**Выводы.** Количественная оценка изменения управляемости транспортным средством позволяет внести предложения по усовершенствованию стабилизаторов движения колеса по пересеченной местности, а также разработать рекомендации по обеспечению безопасности движения на дорогах.

**Ключевые слова:** неровности, дорога, пневмоколесное оборудование, кинематика, качество.

**Благодарности:** Авторы выражают искреннюю благодарность членам редакционной коллегии журнала, рецензентам.

Ссылка для цитирования:

Сладкова Л.А. Влияние неровностей дорог на изменение кинематики движения пневматического колеса / Л.А. Сладкова, А.С. Кириленков, В.В. Филатчев // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 2. – С. 42-49. doi: 10.30987/2782-5957-2026-2-42-49.

Original article  
Open Access Article

# INFLUENCE OF ROAD IRREGULARITIES ON THE CHANGE IN KINEMATICS OF THE PNEUMATIC WHEEL

Lyubov Aleksandrovna Sladkova<sup>1✉</sup>, Andrey Sergeevich Kirilenkov<sup>2</sup>, Vladislav Vladimirovich Filatchev<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

<sup>1</sup> rich.cat2012@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6786-0386>

<sup>2</sup> kirilenkovas@mail.ru

<sup>3</sup> arokosidas@yandex.ru

## Abstract

Road irregularities are one of the main causes of traffic accidents. It is known from experience of drivers that accidents most often occur when the vehicle leaves a pothole due to difficulties associated with steering. There are no absolutely flat surfaces on roads and terrain, and the unevenness can also be located across or at an acute angle to the movement direction, exceeding the parameters allowed by regulations in some cases. The operation experience shows that the road micro profile affects the change in the direction of the car lateral movement. If the car is moving along a linear path, then irregularities lead to the fact that such movement in the profile may be a curve.

**The paper objective.** To study the influence of the road micro profile on the change in the kinematics of the pneumatic wheel of the vehicle.

**The task.** Using the research results to develop devices for vehicle movement stabilization, taking into account changes in the road profile.

**The research methods** are based on the principles of interacting a pneumatic wheel propeller with the road surface and the basic principles of theoretical mechanics.

**The novelty of the work.** Theoretical dependences are obtained that make it possible to evaluate qualitatively and quantitatively the change in the speed of the wheel movement when encountering a threshold obstacle.

**The study results.** Taking into account the research results obtained, it is possible to monitor changes in the coefficient of wheel slipping, as well as to make a device for stabilizing vehicle movement over rough terrain.

**Conclusions.** A quantitative assessment of changes in vehicle control allows to make proposals for improving wheel movement stabilizers over rough terrain, as well as to develop recommendations for road safety.

**Keywords:** irregularities, road, pneumatic wheeled equipment, kinematics, rolling.

**Acknowledgements:** The authors acknowledge the members of the editorial board of the journal and the reviewers.

## Reference for citing:

Sladkova LA, Kirilenkov AS, Filatchev VV. Influence of road irregularities on the change in kinematics of the pneumatic wheel. *Transport Engineering*. 2026;2:42-49. doi: 10.30987/2782-5957-2026-2-42-49.

## Введение

Доля условно прямолинейного движения транспортных средств составляет 30...35 % от общего времени. Движение машины по траектории с предельными (минимальными) радиусами кривизны осуществляется весьма редко, причем с очень малой скоростью, обычно при маневрировании. Ликвидация чрезвычайных ситуаций (техногенных аварий, катастроф, стихийных бедствий, характеризующихся обвалами зданий и сооружений и созданием многочисленных дефектов покрытий дорог и, изменением рельефа местности), обуславливает необходимость ее оснаще-

ния надежным ходовым оборудованием с наличием стабилизаторов движения. Процесс взаимодействия пневматического колеса с выступами (порогами) изучен в недостаточной степени. Учитывая состояние дорог в России, решение этой задачи также будет актуально при создании беспилотных транспортных средств.

Уместно предположить, что для выполнения работ по подготовке обходов опасных объектов нужно применять пневмоколесную технику, способную преодолевать опасные зоны, в которых могут возникать аварийные ситуации.

## Постановка задачи

На взаимодействие колеса с опорной поверхностью непосредственно влияют механические свойства грунта, которые определяются гранулометрическим соста-

вом, влажностью и т.д. Если напряжения превышают связи между частицами грунта, происходит сдвиг одних частиц грунта относительно других, и при последова-

тельном увеличении нагрузки наступает течение грунта в стороны из-под вдавливаемого тела. Отметим, что нагрузка  $p_s$ , при которой происходит течение грунта, называется несущей способностью грунта. Грунты важнейшими являются те, которые определяют формирование сил взаимодействия с колесом. Это сопротивление грунта нормальным нагрузкам (сопротивление сжатию или уплотнению) и тангенциальным (сопротивление сдвигу).

Поскольку грунты различны по своему составу, структуре, плотности, то характеристики сопротивления грунтов нормальным нагрузкам также различны. Единое аналитическое выражение, характеризующее зависимость его деформации от нагрузки, подобрать очень трудно.

Конструкция и эффективность пневмоколесного ходового оборудования определяются условиями взаимодействия колеса с грунтом. В зависимости от механических свойств пневматической шины и грунта в массиве, по поверхности которого она перекатывается, различают три характерных случая их взаимодействия:

- деформируется только грунтовой массив;
- деформируется только пневматическая шина;
- деформируется как шина, так и грунтовой массив под шиной.

Первый случай взаимодействия соответствует условиям, при которых жесткость колеса во много раз превышает жесткость грунта в массиве. Во втором случае жесткость грунта в массиве намного больше жесткости пневматической ши-

ны. В третьем, наиболее общем случае взаимодействия, жесткости грунта и шины соизмеримы, поэтому в расчетах тяговой силы необходимо принимать во внимание физико-механические свойства и грунта, и шины.

В тяговых расчетах машин с пневмоколесным ходовым оборудованием определяющее значение имеют три фактора взаимодействия грунта и колеса с пневматической шиной: сопротивление качению, скольжение и сцепление.

Опорные поверхности, по которым движутся машины, делятся на плоские и неровные. Причем плоские могут быть горизонтальными или наклонными. Абсолютно плоских поверхностей на дорогах и местности нет, поэтому для исследования ряда вопросов за плоскую поверхность будем принимать такую, движение по которой практически не отражается на характере взаимодействия машины с этой поверхностью. Неровность может располагаться также поперек или под острым углом к направлению движения. Если размер такой неровности превышает размер машины [3], то ее также называют уклоном или косогором.

Неровности дороги оказывают существенное влияние на изменение динамического состояния машины (удары, колебания колес и кузова), проходимость, маневренность.

В соответствии с исследованиями Радовского Б.С. предлагается учитывать коэффициент динамичности колесной нагрузки в зависимости от скорости перемещения автомобиля по данным, приведенным в табл. 1 [1].

Таблица 1

Коэффициент динамичности колесной нагрузки

Table 1

*Wheel load dynamic coefficient*

Скорость движения автомобиля, км/час	10	20	30	40	50	60	80	100
Коэффициент динамичности	1,12	1,21	1,28	1,34	1,38	1,41	1,45	1,47

Для участков автомобильных дорог с неудовлетворительной ровностью (рис. 1) наблюдается значительный разброс величин коэффициента динамичности (от 1,2

до 2,5) в зависимости от микропрофиля дорожного покрытия, осевой нагрузки и скорости движения автомобиля.



Рис.1. Неровности дорог  
Fig 1. Road bumps

Очевидно, что величина коэффициента динамичности является функцией скорости и массы автомобиля [1, 4, 5], которая должна изменяться в зависимости от состояния ровности дороги. Рассмотрим неровность дороги как пороговое препятствие, состоящее из выступов и уступов.

В современных научных исследованиях рассматриваемая теоретическая зави-

симость при преодолении пороговых препятствий позволяет оценить предельную величину выступа  $h_n$ , преодолеваемого машиной либо по тягово-сцепными характеристикам машины, либо по геометрическим (габаритным) параметрами машины. В этом случае авторами [1, 4, 5] рекомендуется использовать расчетные схемы, представленные на рис. 2.

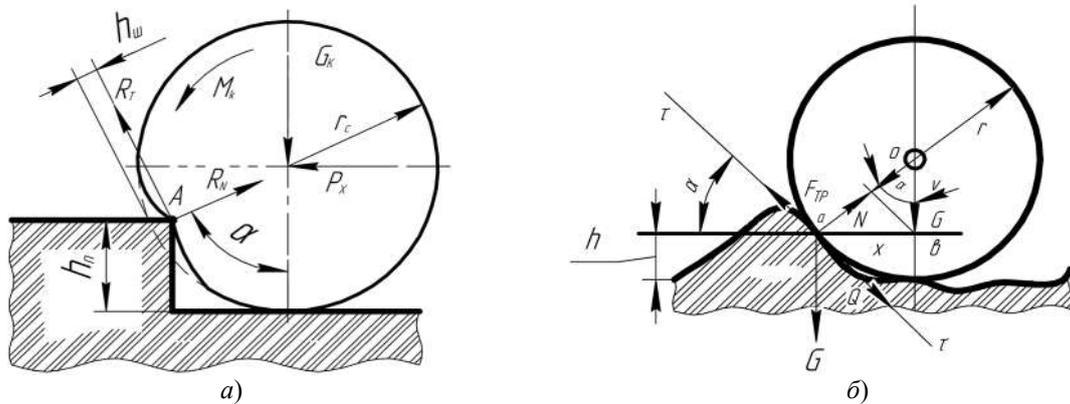


Рис. 2. Схема взаимодействия колеса с неровностями по рекомендациям:  
a – [1, 4, 5]; б – [5]

Fig. 2. Scheme of interaction of the wheel with bumps according to the recommendations:  
a – [1, 4, 5]; b – [5]

Здесь на колесо, являющееся частью многоколесного движителя, действуют нормальная нагрузка колеса  $G_k$ , сила тяги  $P_x$ , крутящий момент  $M_k$ , сила тяги и реакции со стороны выступа: нормальная  $R_N$  и тангенциальная  $R_T$ , величина которых видна на рис. 2a. Недостатком предложенной расчетной схемы является то, что учтена единственная составляющая реакции со стороны выступа  $R_N$  без учета реакции опоры со стороны уступа в точке B.

В расчетной схеме (рис. 2б) уступ и выступ представлены в виде равнобедренного треугольника.

В соответствии с рис. 2a спроектируем силы, действующие на колесо при преодолении неровности в виде порога, проектируя на оси  $n$  и  $\tau$ .

$$R_N = G_k \cos \alpha + P_x \sin \alpha; \quad (1)$$

$$R_T = G_k \sin \alpha - P_x \cos \alpha. \quad (2)$$

Совместное решение (1 и 2) позволит определить угол преодоления порогового препятствия



Тогда скорость  $v$  на образующей колеса в произвольной точке  $M$  будет равна равнодействующей двух скоростей относительно двух МЦС, находящихся в точках  $M_1$  и  $M_2$ .

Окружные скорости  $v_1$  и  $v_2$  колеса при МЦС, находящемся соответственно в точках  $M_1$  и  $M_2$  (рис. 3), равны:

$$v_1 = M_1 M \omega; \quad (10)$$

$$v_2 = M_2 M \omega. \quad (11)$$

Определим расстояние  $OM_1$  и  $OM_2$ . На рис. 3 видно, что:

$$OM_1 = OM_2 = r,$$

где  $r$  – радиус колеса.

Пусть угол  $M_2CM_1 = \alpha$ .

Тогда углы будут равны:

$$M_2OM_1 = 180 - \alpha; \quad M_2MM_1 = (180 - \alpha)/2;$$

$$M_1MK = 90 - \frac{180 - \alpha}{2} = \frac{\alpha}{2}.$$

На рис. 3 видно, что:

$$KMT = 90 - \frac{\alpha}{2}. \quad (12)$$

Окружная скорость колеса определяется по формуле:

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + 2v_1v_2 \cos\left(90 - \frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (13)$$

Определим расстояния  $CM_1$ ,  $CM_2$  и  $CO$ :

$$CM_2 = CM_1 = \frac{r}{\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}}; \quad CO = \frac{r}{\sin\frac{\alpha}{2}}. \quad (14)$$

Положение точки  $M$  относительно  $M_1$  имеет координаты:  $M(x_1, y_1)$ .

Точка  $M_2$  относительно  $M_1$  имеет координаты:

$$y_2' = \frac{r \sin \alpha}{\tan \frac{\alpha}{2}}; \quad (15)$$

$$x_2' = CM_1 + M_2C \cos(180 - \alpha) = \frac{r}{\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}} (1 - \cos \alpha). \quad (16)$$

Очевидно, что угол  $\alpha > 90^\circ$ .

Положение точки  $M$  относительно точки  $M_2$  имеет координаты  $M(x_2, y_2)$ . Тогда

$$x_2 = x_1 + x_2' = x_1 + \frac{r}{\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}} (1 - \cos \alpha); \quad (18)$$

$$y_2 = y_1 + y_2' = y_1 + \frac{r \sin \alpha}{\tan \frac{\alpha}{2}}. \quad (19)$$

Тогда расстояния будут равны:

$$M_1M = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}; \quad (20)$$

$$M_2M = \sqrt{x_2^2 + y_2^2} = \sqrt{\left[x_1 + \frac{r}{\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}} (1 - \cos \alpha)\right]^2 + \left(y_1 + \frac{r \sin \alpha}{\tan \frac{\alpha}{2}}\right)^2}. \quad (21)$$

Определим скорости  $v_1$  и  $v_2$

Скорости  $v_1$  и  $v_2$  в точке  $M$  будут равны:

$$v_1 = \omega \sqrt{x_1^2 + y_1^2}; \quad (22)$$

$$v_2 = \omega \sqrt{\left[x_1 + \frac{r}{\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}} (1 - \cos \alpha)\right]^2 + \left(y_1 + \frac{r \sin \alpha}{\tan \frac{\alpha}{2}}\right)^2}. \quad (23)$$

Из зависимостей (21 и 22) видно, что при попадании одного из колес автомобиля в выбоину перед порогом, происходит изменение скорости вращения на этом колесе, которое зависит от глубины выбоины и диаметра колеса.

Квадрат результирующей скорости  $v$  перемещения точки, принадлежащей ободу колеса, будет определяться по зависимости:

$$v^2 = \omega^2 \left\{ (x_1^2 + y_1^2) + (x_1 + r \sin \alpha)^2 + \left(y_1 - 2r \cos^2 \frac{\alpha}{2}\right)^2 \right\} - \omega^2 \left\{ 2 \cos \frac{\alpha}{2} \sqrt{(x_1^2 + y_1^2)} [(x_1 + r \sin \alpha)^2] + \left(y_1 - 2r \cos^2 \frac{\alpha}{2}\right)^2 \right\}, \quad (24)$$

где  $x_1$  и  $y_1$  – координаты точки  $M$  на ободе колеса относительно точек его касания  $M_2$  и  $M_1$  с вертикальной и горизонтальной плоскостями (рис. 3), соответственно, которм видно, что границы изменения параметров  $x_1$ ,  $y_1$  и  $\alpha$  изменяются следующим образом:

$$x_1 \in [-r; +r]; \quad (25)$$

$$y_1 \in [0; 2r]; \quad (26)$$

$$\alpha \in [0; 180^\circ] \quad (27)$$

В пределах изменения этих переменных величина результирующей скорости на ободе колеса будет изменяться в зави-

симости от радиуса колеса  $r$  и угла  $\alpha$  образованного касательными в точках контакта колеса с поверхностью дороги и порога, т.е. от размеров высоты порога  $y_2$ .

На рис. 3 видно, что величина  $y_1$  – высота порога, а величина  $x_1$  зависит от радиуса колеса.

Численный эксперимент (24) проводился в программном продукте *Excel*.

Графическая интерпретация зависимости (24) с учетом границ изменения величин  $x_1$ ,  $y_1$  и  $\alpha$  представлена на рис.4.

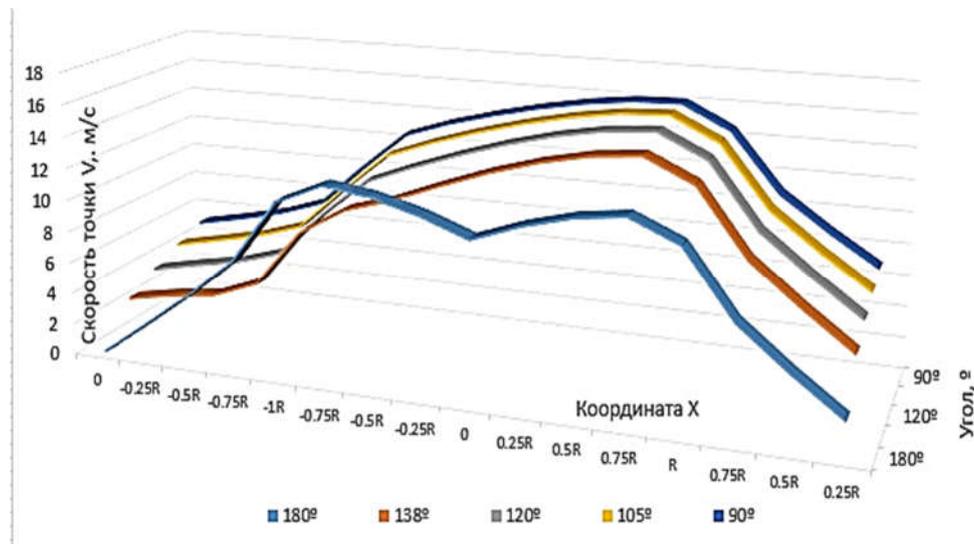


Рис. 4. Изменение результирующей скорости  $v$  на ободе колеса при наезде на порог

Fig 4. Changing the Speed of the Resultant Velocity  $v$  on the Wheel Rim when hitting the threshold

На рис.4 видно, что при изменении координаты  $x$ , в пределах изменения радиуса колеса  $r$ , при увеличении высоты порога величина результирующей скорости снижается, а при высоте порога более  $0,25r$  скорость снижается практически в 10 раз.

**Вывод.** Проведение исследований по определению влияния высоты порога неровности дороги на изменение линейной скорости вращения колеса позволило количественно оценить изменение управляе-

мости транспортным средством, что позволит:

- перейти к оценке коэффициента буксования;
- разработать рекомендации по обеспечению безопасности движения на дорогах;
- разработать стабилизаторы движения транспортных средств на пневмоколесном ходовом оборудовании, в том числе, по пересеченной местности.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации по учету увеличения динамического воздействия по мере накопления неровностей и определение коэффициен-

- та динамичности в зависимости от показателя неровности. М.: Росавтодор, 2015. 35 с.
2. ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация» М., Сандартинформ, 2013. 38 с.

3. СП 34.133ЭО 2012 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05-02-85. Дата введения 01.07.2013 г
4. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин. - М: Машиностроение, 1990г. -
5. Муратов А., Кайнарбеков А., Абынагиева Ж.Г., Аканова Ж.Ж. Исследование особенностей взаимодействия

имодействия колесного движителя с поверхностью дороги в зависимости от его геометрической формы. Алматы, Республика Казахстан, КУПС

6. Тарг С.М. Основы теоретической механики : учебник Москва, Машиностроение, 2020. 246 с.

## REFERENCES

1. Industry road guidance document. Methodological recommendations for taking into account the increase in dynamic impact as irregularities accumulate and determining the coefficient of dynamism depending on the indicator of irregularity. Moscow: Rosavtodor; 2015.
2. GOST 25100-2011 Soils. Classification. Moscow: Sandartinform; 2013.
3. Rules 34.133EA 2012 Automobile roads. [place unknown]. 2013 Jan 07.

4. Smirnov GA. Theory of wheeled vehicles movement. Moscow: Mashinostroenie; 1990.
5. Muratov A, Kaynarbekov A, Abynagieva ZhG, Akanova ZhZh. Study of the peculiarities of wheel propeller interaction with the road surface depending on its geometric shape. Almaty: KUPS.
6. Targ SM. Fundamentals of theoretical mechanics: textbook. Moscow Mashinostroenie; 2020.

## Информация об авторах:

**Сладкова Любовь Александровна** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические средства», Российский университет транспорта, тел. +7(964789-56-63).

**Кириленков Андрей Сергеевич** – аспирант кафедры «Наземные транспортно-технологические

средства», Российский университет транспорта, тел.+7(911) 990-73-86.

**Филатчев Владислав Владимирович** – аспирант кафедры «Наземные транспортно-технологические средства», Российский университет транспорта, тел.+7(919) 685-70-64.

**Sladkova Lyubov Aleksandrovna** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Ground Transport and Technological Facilities, Russian University of Transport, phone: +7(965) 377-93-89

**Kirilenkov Andrey Sergeevich** – Postgraduate student of the Department of Ground Transport and Techno-

logical Facilities, Russian University of Transport, phone: +7(911) 990-73-86.

**Filatchev Vladislav Vladimirovich** – Postgraduate student of the Department of Ground Transport and Technological Facilities, Russian University of Transport, phone: +7(919) 685-70-64.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**

**Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 27.10.2025; одобрена после рецензирования 19.01.2026; принята к публикации 27.01.2026. Рецензент – Сьянов С.Ю., кандидат технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, заместитель главного редактора журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 27.10.2025; approved after review on 19.01.2026; accepted for publication on 27.01.2026. The reviewer is Syanov S.Yu., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, Deputy Editor-in-Chief of the journal *Transport Engineering*.