

Научная статья

УДК 629.114.2:621.828.6

Оптимизация параметров грунтозацепов гусеничных движителей на основе анализа механизма взаимодействия с грунтом

Артем Владимирович Кулабухов

Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования

«Белорусско-Российский университет», Могилев, Республика Беларусь

kulabuhov1981@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7241-6041>

Аннотация. Представлены результаты исследования силового взаимодействия гусеничного движителя с грунтом. Выявлено, что классический подход к проектированию, направленный на увеличение количества и высоты грунтозацепов, не является оптимальным. Разработана усовершенствованная методика расчета, учитывающая неравномерное распределение нагрузки по длине гусеничной ленты и двухфазный характер разрушения грунта. Установлены рациональные соотношения геометрических параметров грунтозацепов, позволяющие повысить коэффициент сцепления. Показано существенное влияние динамики нагружения движителя на реализацию тягового усилия.

Ключевые слова: гусеничный движитель, грунтозацеп, сила тяги, коэффициент сцепления, двухфазное разрушение, оптимизация, буксование.

Для цитирования: Кулабухов А.В. Оптимизация параметров грунтозацепов гусеничных движителей на основе анализа механизма взаимодействия с грунтом // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2025. № 4 (46).

Original article

Optimization of the parameters of track lugs based on the analysis of the mechanism of interaction with soil

Kulabukhov Artem V.

Interstate Educational Institution of Higher Education "Belarusian-Russian University",
Mogilev, Republic of Belarus

kulabuhov1981@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7241-6041>

№ 4(46)

декабрь 2025

Abstract. The results of a study of the force interaction between a tracked drive and the ground are presented. It is revealed that the classical design approach, aimed at increasing the number and height of lugs, is not optimal. An improved calculation method is developed that takes into account the uneven load distribution along the track and the two-phase nature of soil failure. Rational relationships between the geometric parameters of the lugs are established, allowing for an increase in the traction coefficient. A significant influence of the load history of the tracked drive on the traction force is demonstrated.

Keywords: tracked drive, lug, traction force, traction coefficient, two-phase failure, optimization, slippage.

For citation: Kulabukhov A.V. Optimization of the parameters of track lugs based on the analysis of the mechanism of interaction with soil. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2025. № 4 (46).

1. Вводная часть и новизна исследования

Повышение эффективности землеройно-транспортных машин напрямую связано с улучшением сцепных свойств их движителей. Несмотря на распространенное мнение о значительном преимуществе гусеничных движителей перед колесными, сравнительный анализ коэффициентов сцепления [9] демонстрирует, что это превосходство на типичных грунтах не столь существенно. Это указывает на неполное использование потенциала грунтозацепов, чья работа традиционно упрощается в расчетных моделях.

Существующие модели часто не учитывают последовательный характер взаимодействия грунтозацепов с грунтом. Исследования [10] подтверждают, что при срыве последнего грунтозацепа происходит перераспределение нагрузки на остальные, что в условиях жесткой гусеничной ленты приводит к прогрессирующей деформации грунта под каждым предыдущим грунтозацепом. Это обуславливает их неравномерное нагружение и то, что предельное состояние сцепления достигается при разрушении грунта лишь под конечным элементом ленты.

Новизна данного исследования заключается в комплексном подходе, объединяющем:

1. Модель неравномерного распределения нагрузки по грунтозацепам с линейно возрастающей деформацией грунта под каждым последующим трактом.

2. Учет двухфазного механизма разрушения грунта, включающего стадию формирования и дальнейшего переформирования площадок сдвига.

3. Анализ влияния не только геометрических параметров грунтозацепов, но и кинетики приложения нагрузки на реализуемое тяговое усилие.

Цель работы – разработка методики оптимизации параметров грунтозацепов, позволяющей повысить коэффициент сцепления гусеничных землеройно-транспортных машин.

2. Методика исследования

В основу методики положена расчетная схема, согласно которой при постепенном нагружении движителя деформация грунта под i -м грунтозацепом описывается зависимостью:

$$\Delta_i = i\Delta,$$

где Δ – единичная деформация грунта под трактом гусеницы.

Соответствующее усилие на i -й грунтозацеп определяется как:

$$P_i = \Delta_i k_{\Delta} \quad (1)$$

где k_{Δ} – коэффициент жесткости грунта.

В первом приближении распределение усилий принимается линейным, хотя можно использовать и иное. Суммарная сила тяги по сцеплению для машины с z грунтозацепами на одной ленте выводится из выражения:

$$F = 2 \left(\frac{\mu G}{2} + c b t \sum_{i=1}^z i + 2 c h t \sum_{i=1}^z i \right) \quad (2)$$

где μ – коэффициент трения гусеницы о грунт; G – вес машины; c – удельное сцепление грунта; b, t, h – ширина, шаг и высота грунтозацепов.

Для анализа разрушения грунта отдельным траком применялся подход, основанный на механике грунтов и теории резания [4]. Особенностью метода является рассмотрение двухфазного процесса:

- фаза I: Первичное разрушение грунта и формирование площадки сдвига OB' , рассчитываемое по теории давления грунта на подпорные стенки (рис. 1);
- фаза II: Быстрое переформирование этой площадки в новое устойчивое положение OB , сопровождающееся доуплотнением грунта и его «течением» (см. рис. 1).

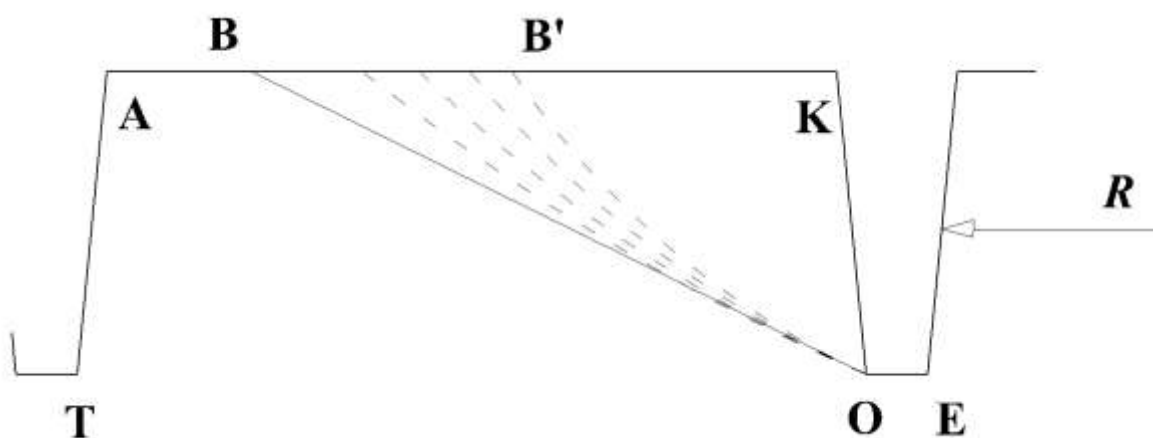


Рис. 1. Переформирование площадки скольжения

На каждой стадии оценивалась возможность одного из трех сценариев:

- срез призмы грунта между грунтозацепами по линии OT , в случае если площадка скольжения OB' , выходит за пределы предыдущего грунтозацепа (рис. 2);

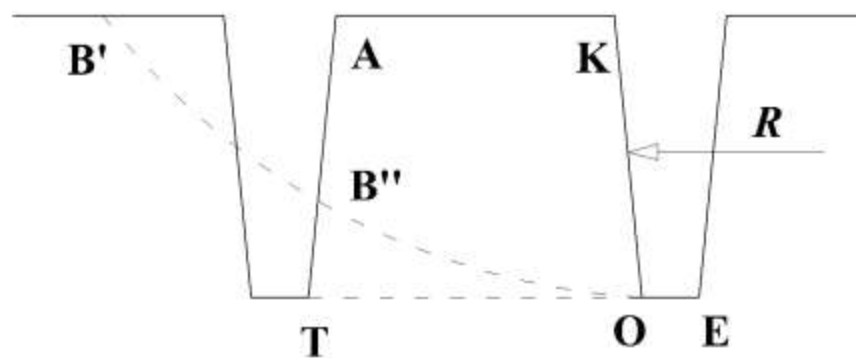


Рис. 2. Срез грунта по вершинам грунтозацепов

- разрушение грунта TAG у задней грани предыдущего грунтозацепа, что увеличивает критический угол наклона площадки скольжения (с $\psi_{кр}^1$ до $\psi_{кр}^2$), при котором происходит разрушение грунта между грунтозацепами (рис. 3);

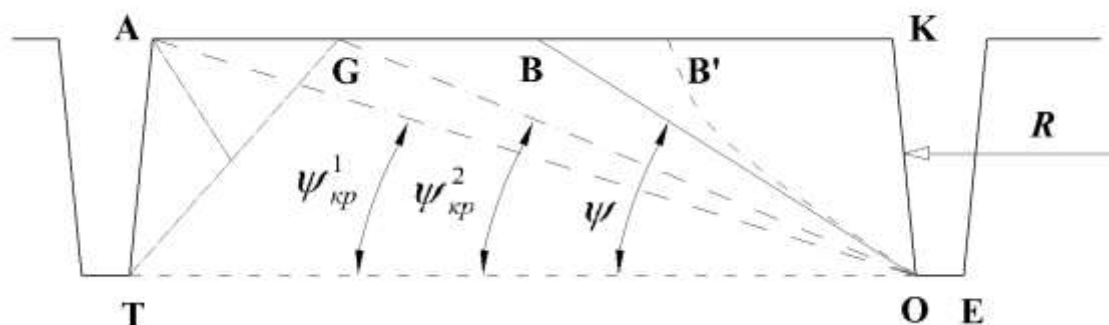


Рис. 3. Общая схема разрушения грунта

- вытеснение трака из грунта выклиниваемой призмой OBK (рис. 4).

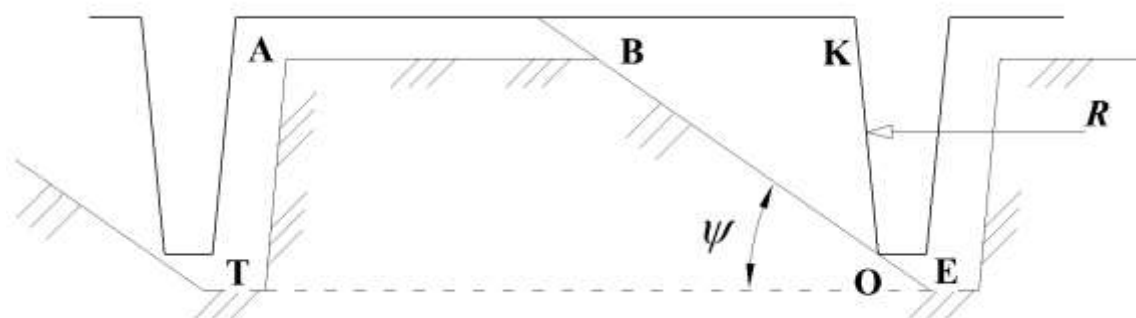


Рис. 4. Выклинивание трака вытесняемой призмой грунта

Объектом исследования выбран бульдозер Б14 с базовыми параметрами: вес $G = 245,2$ кН, длина опорной поверхности гусеницы $L = 3182$ мм, ширина гусеницы $b = 560$ мм, шаг грунтозацепов $t = 203$ мм, высота грунтозацепов $h = 65$ мм.

3. Экспериментальная часть (результаты расчетов и их анализ)

Расчеты для грунтов I-II и II-III категорий ($c = 5...30$ кПа и $c = 30...60$ кПа соответственно, $\mu = 0.5$) показали соответствие экспериментальным данным [9], подтвердив адекватность предложенной модели с треугольной эпюрой нагрузок для случая плавного нагружения.

Ключевые результаты оптимизации параметров для грунта III категории (коэффициент сцепления $\varphi = 27^\circ$, $c = 59$ кПа) представлены на графиках (рис. 5 и 6).

Влияние шага грунтозацепов (при их типовой высоте $h = 0.065$ м):

- Малый шаг ($T < 0,19$ м): происходит срез всего массива грунта под траком уже в фазе I, что является неблагоприятным сценарием.
- Средний шаг ($0,19\text{ м} < T < 0,42$ м): Наблюдается переформирование площадки сдвига (фаза II) с последующим срезом оставшейся призмы грунта между зацепами. Реализуется максимальная несущая способность грунта.
- Большой шаг ($T > 0,42$ м): Переформирование приводит к вытеснению трака из грунта, часть грунта между зацепами остается неразрушенной, что снижает силу тяги.

Влияние высоты грунтозацепов (при их типовом шаге $T = 0.203$ м):

- Малая высота ($h < 0,026$ м): доминирует процесс вытеснения трака.
- Средняя высота ($0.026\text{ м} < h < 0.074$ м): протекает фаза II с переформированием площадки скольжения и последующим срезом грунта.
- Большая высота ($h > 0.074$ м): происходит полный срез грунта в фазе I, что неэффективно.

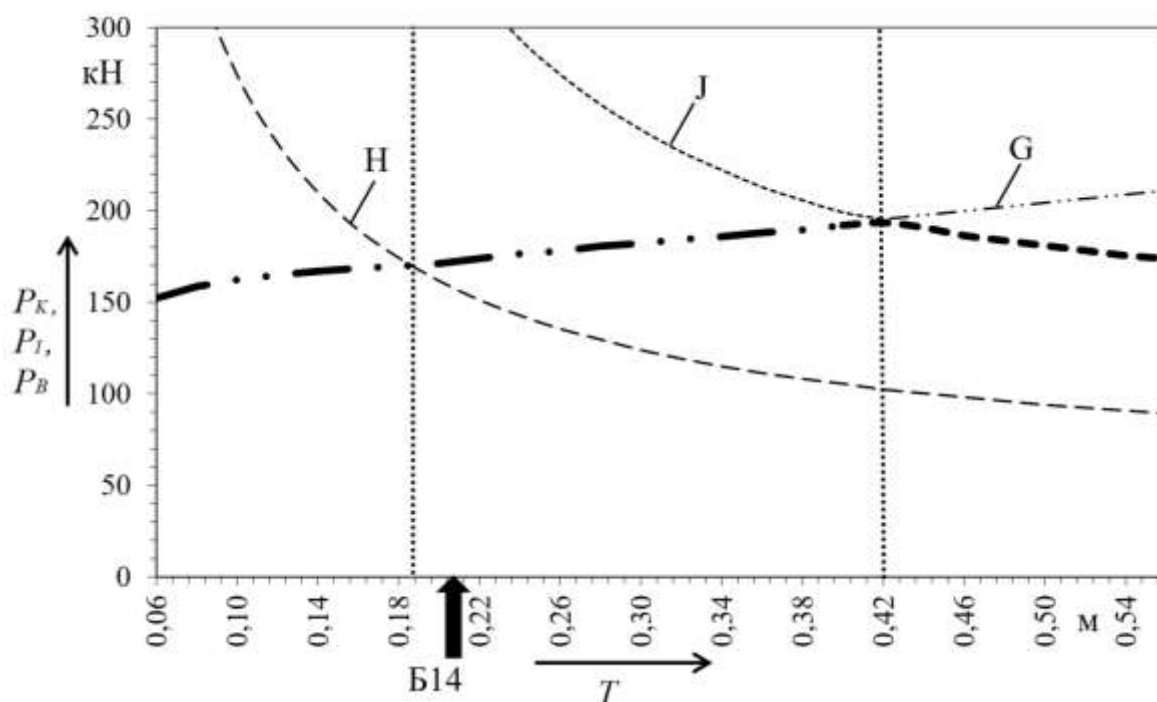


Рис. 5. Влияние шага грунтозацепов на: P_K – касательную силу, необходимую для среза грунта (линия G); P_I – условную касательную силу, при которой появляется первичная площадка скольжения (линия H); P_B – условную касательную силу, при которой траки выклиниваются из грунта (линия J).

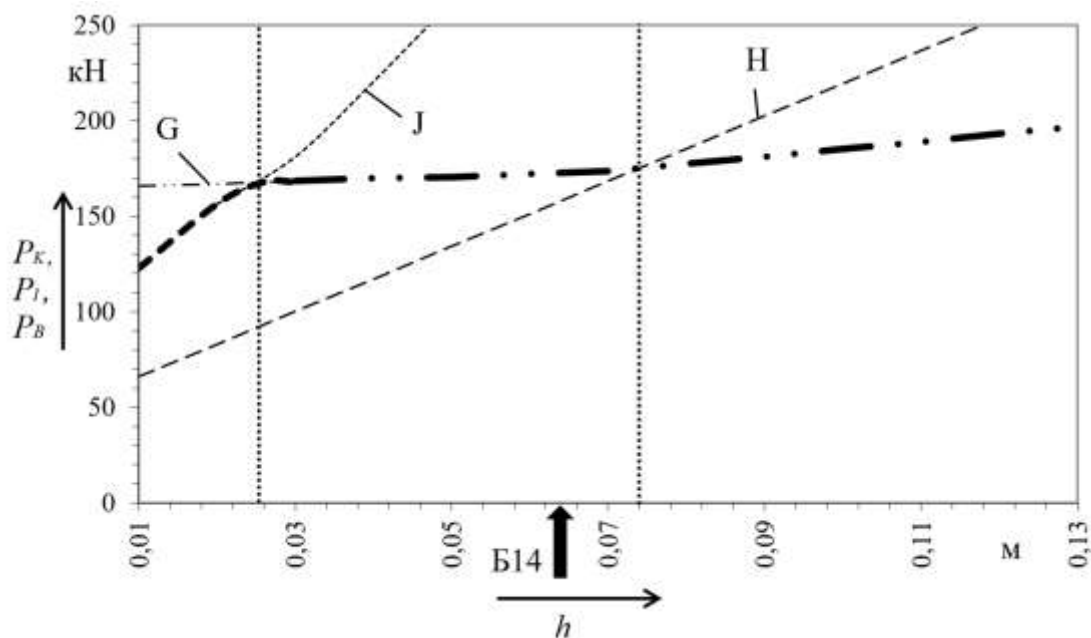


Рис. 6. Влияние шага грунтозацепов на: P_K – касательную силу, необходимую для среза грунта (линия G); P_I – условную касательную силу, при которой появляется первичная площадка скольжения (линия H); P_B – условную касательную силу, при которой траки выклиниваются из грунта (линия J).

Анализ показал, что для бульдозера Б14 при $h = 0,065$ м рациональным является увеличение шага грунтозацепов до ~ 0.42 м. При этом высоту зацепов можно существенно снизить (до 0.026 м) без потери силы тяги, что улучшит заглубляемость и снизит сопротивление движению.

Было установлено, что при быстром (ударном) приложении нагрузки эпюра распределения усилий между грунтозацепами изменяется с треугольной на прямоугольную. В этом случае все грунтозацепы одновременно нагружаются до предела, что приводит к скачкообразному росту коэффициента сцепления. Расчеты по формуле (2) с прямоугольной эпюрой и уточненной по разработанной методике показали, что для бульдозера Б14 на грунтах II-III категорий коэффициент сцепления может достигать пиковых значений $\varphi_{сц} = 1.5 \dots 1.8$, однако они носят кратковременный характер.

Практическая реализация оптимизации может быть осуществлена двумя способами: установкой грунтозацепов через один трак (для увеличения эффективного шага) или уменьшением их высоты при существующем шаге.

4. Выводы

1. Разработана методика расчета силового взаимодействия гусеничного движителя с грунтом, учитывающая неравномерное распределение нагрузки по грунтозацепам и двухфазный характер разрушения грунта, адекватность которой подтверждена сопоставлением с экспериментальными данными.

2. Установлено, что для реализации максимального тягового усилия необходимо обеспечить такое соотношение шага и высоты грунтозацепов, при котором разрушение грунта происходит по сценарию с переформированием площадки сдвига (фаза II) и последующим срезом призмы между зацепами.

3. Показано, что параметры грунтозацепов бульдозера Б14 не являются рациональными. Оптимизация (увеличение шага до ~ 0.42 м и/или

снижение высоты до $\sim 0,026\text{м}$) позволяет повысить коэффициент сцепления в типичных условиях с 0.81 до 0.89.

4. Выявлено значительное влияние динамики нагружения на силу тяги. При быстром, ударном приложении нагрузки коэффициент сцепления может достигать пиковых значений (до 1.8), что необходимо учитывать при проектировании и расчетах на прочность.

Список источников

1. Алябьев, А. Ф. Модель взаимодействия гусеницы трактора с грунтом / А. Ф. Алябьев, С. Ю. Калинин // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2016. – Т. 20, № 2. – С. 173-178. – EDN VYUIZB.
2. Алябьев, А. Ф. Обоснование технологических комплексов машин для лесовосстановления / А. Ф. Алябьев. – Москва : Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2010. – 267 с. – ISBN 978-5-8135-0529-4. – EDN QLBYLY.
3. Бахтин, П. У. Технологические свойства почв : монография / П. У. Бахтин, В. Н. Винокуров, А. Ф. Алябьев. – Москва : Изд-во Московского гос. ун-та леса, 2014. – 168 с. – ISBN 978-5-8135-0603-1.
4. Берестов, Е. И. Соппротивление грунтов резанию / Е. И. Берестов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 1997. – № 10. – С. 102-107.
5. Боровских, А. М. Разработка новых и совершенствование существующих конструкций узлов гусеничных движителей для лесных машин : монография / А. М. Боровских. – Екатеринбург : Уральский гос. лесотехнический ун-т, 2007. – 268 с. – ISBN 978-5-94984-128-0.
6. Ветров, Ю. А. Резание грунтов землеройными машинами / Ю. А. Ветров. – Москва : Машиностроение, 1971. – 357 с.
7. Гуськов, В. В. Оптимальные параметры сельскохозяйственных тракторов / В. В. Гуськов. – Москва : Машиностроение, 1966. – 196 с.
8. Ляско, М. И. Влияние шага и высоты грунтозацепов на величину коэффициента сцепления гусеничного трактора / М. И. Ляско, Н. И. Зайдельман, В. О. Слажинский // Труды МАДИ. – Москва : МАДИ, 1976. – Вып. 114. – С. 115–119.
9. Машины для земляных работ / Д. П. Волков, В. Я. Крикун, П. Е. Тотолин [и др.]; Под общ. ред. Д. П. Волкова. – Москва : Машиностроение, 1992. – 447 с. – ISBN 5-217-01973-5.
10. Забавников, Н. А. Основы теории транспортных гусеничных машин / Н. А. Забавников. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1975. – 448 с.

References

1. Alyab'yev A.F. Kalinin S.Yu. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa - Lesnoy vestnik*, 2016, vol. 20, no. 2, pp. 173-178.
2. Alyab'yev A.F. *Obosnovaniye tekhnologicheskikh kompleksov mashin dlya lesovosstanovleniya* (Justification of technological complexes of machines for reforestation), Moscow, Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet im. N.E. Baumana (natsional'nyy issledovatel'skiy universitet), 2010, 267 p. ISBN 978-5-8135-0529-4.
3. Bakhtin P.U. Vinokurov V.N., Alyab'yev A.F. *Tekhnologicheskiye svoystva pochv* (Technological properties of soils), Moscow, Izd-vo Moskovskogo gos. un-ta lesa, 2014, 168 p.
4. Berestov Ye. I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*, 1997, no.10, pp. 102-107.
5. Borovskikh A.M. *Razrabotka novykh i sovershenstvovaniye sushchestvuyushchikh konstruktsiy uzlov gusenichnykh dvizhiteley dlya lesnykh mashin* (Development of new and improvement of existing designs of track units for forestry machines), Yekaterinburg, Ural'skiy gos. lesotekhnicheskiiy un-t, 2007, 268 p.
6. Vetrov, Yu.A. *Rezaniye gruntov zemleroynymi mashinami* (Cutting Soils with Earthmoving Machines), Moscow, Mashinostroyeniye, 1971, 357 p.
7. Gus'kov V.V. *Optimal'nyye parametry sel'skokhozyaystvennykh traktorov*, Moscow, Mashinostroyeniye, 1966, 196 p.
8. Lyasko, M.I. Zaydel'man N.I., Slazhinskiy V.O. *Trudy MADI*, Moscow, MADI, 1976, vol. 114, pp. 115–119.
9. Volkov D.P., Krikun V.Ya., P. Ye. Totolin, et al., editor Volkov D.P. *Mashiny dlya zemlyanykh rabot* (Earthmoving Machines), Moscow, Mashinostroyeniye, 1992, 447 p.
10. Zabavnikov N.A. *Osnovy teorii transportnykh gusenichnykh mashin* (Fundamentals of the Theory of Tracked Transport Vehicles), Moscow, Mashinostroyeniye, 1975, 448 p.

Рецензент: Л.А. Сиваченко, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет

Информация об авторе

Кулабухов Артем Владимирович, доцент, Белорусско-Российский университет.

Information about the author

Kulabukhov Artem V., associate professor, Belarusian-Russian University.

Статья поступила в редакцию 14.10.2025; одобрена после рецензирования 12.12.2025; принята к публикации 19.12.2025.

The article was submitted 14.10.2025; approved after reviewing 12.12.2025; accepted for publication 19.12.2025.

№ 4(46)

декабрь 2025

АВТОМОБИЛЬ • ДОРОГА • ИНФРАСТРУКТУРА

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ