

Контроль и испытания

Controlling and testing

Научная статья

УДК 621.879

DOI: 10.14529/engin250205

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ГУСЕНИЧНОГО БУЛЬДОЗЕРА

И.П. Трояновская¹, *tripav63@mail.ru*, <https://orcid.org/0000-0003-2763-0515>

О.А. Гребенщикова¹, *olgai3@mail.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-5941-211X>

А.А. Абызов², *abyzovaa@susu.ru*

¹Южно-Уральский государственный аграрный университет, Троицк, Россия

²Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Одним из направлений повышения производительности бульдозерного агрегата является правильный выбор эксплуатационных режимов его работы. Максимальные тяговые усилия, с одной стороны, ограничены сцепными свойствами бульдозера, а с другой – возможностями моторно-трансмиссионной установки базового трактора. При этом вертикальные реакции в контакте движителя с грунтом с учетом дополнительных усилий со стороны отвала могут в 1,5 раза превышать вес базового трактора. Это позволило сформулировать цель исследования: изучить закономерности изменения производительности бульдозерного агрегата в зависимости от тяговых усилий базового трактора в различных грунтовых условиях. Определение технической производительности бульдозера проводилось на примере гусеничного бульдозера производства Челябинского тракторного завода с механической трансмиссией. Эксперимент осуществлялся при траншевой разработке грунта I–III категорий с отсыпкой его в кавальер. В процессе эксперимента замерялся объем разработанного грунта при работе на различных передачах. В результате обработки результатов получены зависимости призмы волочения от тягового усилия на различных грунтах. Выявлено, что зависимость технической производительности от удельного тягового усилия имеет ярко выраженный максимум. Это позволило дать рекомендации о рациональном выборе передачи для разработки траншеи на плотном грунте (вторая передача) и слабом грунте (четвертая передача).

Ключевые слова: траншевая разработка грунта, базовый трактор, призма волочения, тяговое усилие, рациональный выбор передачи, грунтовые условия

Для цитирования: Трояновская И.П., Гребенщикова О.А., Абызов А.А. Экспериментальные исследования производительности гусеничного бульдозера // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2025. Т. 25. № 2. С. 52–59. DOI: 10.14529/engin250205

Original article

DOI: 10.14529/engin250205

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE PERFORMANCE OF A TRACKED BULLDOZER

I.P. Troyanovskaya¹, tripav63@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2763-0515>

O.A. Grebenschikova¹, olgai3@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5941-211X>

A.A. Abyzov², abyzovaa@susu.ru

¹ South Ural State Agrarian University, Troitsk, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. One of the areas of productivity improvement is the correct choice of its operating modes of the bulldozer unit. Maximum traction efforts are limited by the coupling properties of the bulldozer on the one hand, and the capabilities of the motor-transmission unit of the base tractor on the other hand. At the same time, vertical reactions in contact with the ground, considering additional efforts from the blade, can be 1.5 times greater than the weight of the base tractor. This allowed us to formulate the goal of the study: to study the patterns of change in the productivity of the bulldozer unit depending on the traction efforts of the base tractor in various soil conditions. The technical productivity of the bulldozer was determined using the example of a crawler bulldozer manufactured by the Chelyabinsk Tractor Plant with a mechanical transmission. The experiment was carried out during trench development of soil of I–III categories with backfilling it into a cavalier. During the experiment, the volume of developed soil was measured when working in various gears. As a result of processing the results, dependences of the drag prism on the traction force on different soils were obtained. It was revealed that the dependence of technical performance on the specific traction force has a clearly expressed maximum. This allowed us to give recommendations on the rational choice of gear for trenching on dense soil (second gear) and soft soil (fourth gear).

Keywords: trench excavation, base tractor, drag prism, traction force, rational choice of gear, soil conditions

For citation: Troyanovskaya I.P., Grebenschikova O.A., Abyzov A.A. Experimental studies of the performance of a tracked bulldozer. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2025:25(2):52–59. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin250205

Введение

В отличие от транспортных машин тракторные агрегаты способны совершать работу только в составе агрегата [1, 2]. Одним из представителей машинно-тракторного агрегата промышленного назначения является бульдозер. Гусеничные бульдозеры нашли широкое применение в гражданском и дорожном строительстве. В связи с этим вопросы повышения эффективности их работы всегда являются актуальными.

Одним из основных направлений увеличения производительности машинно-тракторных агрегатов является увеличение их энергонасыщенности [3, 4]. В связи с этим большое значение приобретают вопросы правильного выбора основных параметров базового трактора, т.е. его тяговых усилий на рабочей передаче.

Вопросами производительности машинно-тракторных агрегатов занимались В.В. Гуськов, В.В. Кацыгин, Д.А. Чудаков, Е.Д. Львов, В.И. Саяпин, М.И. Медведев, Е.М. Харитончик, И.И. Трепененко и многие другие. Их работы помогли разработать типаж и определить основное направление развития сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов [5, 6].

Однако почти 95 % технологического цикла сельскохозяйственного трактора составляет рабочий ход с практически постоянной нагрузкой. Поэтому оптимальное тяговое усилие, соответствующее максимальному КПД, наблюдается при 5 % буксования, что обусловлено необходимостью бережного отношения к почве [7] и зафиксировано в ГОСТ [8].

Технологический цикл промышленных тракторных агрегатов имеет ярко выраженную цикличность, где холостой ход составляет значительную долю, которая у бульдозера составляет не менее

30 % [9]. Кроме того, буксование промышленных тракторных агрегатов не регламентировано и согласно ГОСТ 27434 может достигать 100 % в процессе работы [10, 11]. Это не позволяет методы оптимизации тяговых усилий, разработанные для сельскохозяйственных тракторных агрегатов, применять к промышленным модификациям [12, 13]. В связи с этим вопрос выбора оптимальных тяговых параметров промышленного тракторного агрегата, сохраняют свою актуальность.

С одной стороны, тяговые усилия ограничены сцепными свойствами тракторного агрегата и определяются его весом и грунтовыми условиями [14]. С другой стороны, они обеспечиваются моторно-трансмиссионной установкой базового трактора [15, 16]. Вместе с тем вес бульдозерного агрегата превышает вес базового трактора на 17–22 % [17], а дополнительные усилия со стороны отвала могут увеличивать вертикальные реакции в контакте движителя с грунтом еще в 1,3–1,5 раза [18].

Согласно исследованиям Г.П. Мицына, оптимальные тяговые усилия должны обеспечивать максимальную производительность работы [19]. Это позволяет сформулировать цель исследования.

Цель исследования: изучить закономерности изменения производительности бульдозерного агрегата в зависимости от тяговых усилий базового трактора в различных грунтовых условиях.

Материалы и методы

Определение технической производительности бульдозера должно проводиться при траншевой разработке грунта с отсыпкой его в кавальер [20]. Согласно методике проведения испытаний [21] в процессе разработки траншеи замерялись количество циклов n , длина рабочего и холостого хода и время каждого элемента цикла. В процессе опытов контролировались длина L , глубина h и ширина b траншеи.

Испытания проводились на суглинистом грунте I–III категорий. Через каждые 2 м длины траншеи по ударнику ДорНИИ замеряли плотность грунта C . Дополнительно брались пробы грунта для установления его относительной влажности W , объемного веса γ и коэффициента разрыхления k (табл. 1).

Характеристики грунтовых условий
Characteristics of soil conditions

Таблица 1

Table 1

Тип грунта	Категория	Плотность C , число ударов	Влажность W , %	Объемный вес γ , г/см ³	Коэффициент разрыхления k
Слабый	I	5	25–28	1,9–2,3	1,3–1,4
Плотный	II–III	11	13–17	2–2,5	1,4–2,2

В качестве объекта экспериментальных исследований был выбран бульдозерный агрегат производства Челябинского тракторного завода со стандартным отвалом длиной 3,2 м и высотой 1,2 м [22, 23]. Базовый трактор оснащен механической трансмиссией. Разработка грунта осуществлялась только на первых 5 передачах (табл. 2). На каждой передаче опыт повторялся 3 раза. С целью исключения дополнительной ошибки все опыты проводились одним оператором после отдыха и восстановления.

Технические характеристики базового трактора, обеспечиваемые моторно-трансмиссионной установкой
Technical characteristics of the basic tractor, provided by the motor-transmission unit

Таблица 2

Table 2

Передача	I	II	III	IV	V
Передаточное число	85,5	71,7	61,6	51,9	42,4
Тяговое усилие, P_k (кН)	154	127	108	90,1	70,8

Средний объем призмы волочения равен

$$q = V_{\text{пп}}/n, \quad (1)$$

где $V_{\text{пп}}$ – объем перемещенного грунта (в плотном теле), м³; n – число циклов при разработке траншеи.

Часовая техническая производительность P бульдозера определялась по формуле

$$P = 3600V_p/T_p, \quad (2)$$

где T_p – время, затраченное на разработку траншеи, с.

Объем перемещенного грунта равен [24]

$$V_p = V_p - V_b, \quad (3)$$

где V_p – объем разработанного грунта (в плотном теле), м^3 ; V_b – объем грунта в боковых валиках (в плотном теле), м^3 .

Объем разработанного грунта (в плотном теле) определялся

$$V_p = Lbh, \quad (4)$$

где $L = 40 \pm 0,02$ – длина траншеи, м; b – средняя ширина траншеи, м; h – средняя глубина траншеи (замерялась через каждые 2 м длины траншеи и определялась методом трапеций), м.

Объем грунта в боковых валиках (в плотном теле) определялся

$$V_b = l_b b_b h_b / 2k, \quad (5)$$

где $l_b b_b h_b$ – средняя длина, ширина и высота валика, м; k – коэффициент разрыхления грунта (см. табл. 1).

Результаты и обсуждения

В результате экспериментальных исследований определены средние значения призмы волочения q при работе бульдозера на разных типах грунта и характер ее изменения в зависимости от касательных тяговых усилий трактора P_k (рис. 1).

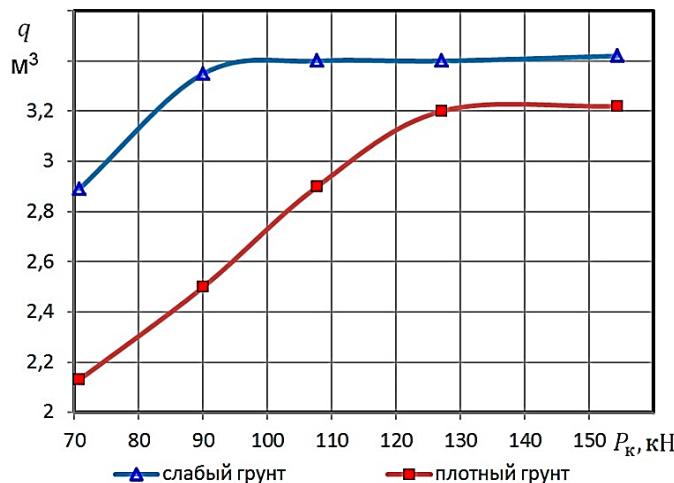


Рис. 1. Зависимость среднего значения призмы волочения q от касательных тяговых усилий трактора P_k в разных грунтовых условиях

Fig. 1. Dependence of the average value of the drag prism q on the tangent's traction forces of the tractor P_k in different soil conditions

При разработке плотного грунта на пятой передаче $P_k = 70,8$ кН объем призмы волочения имеет наименьшее значение $q = 2,13 \text{ м}^3$. При переходе на передачи с большими тяговыми усилиями q растет, доходя до $q = 3,2 \text{ м}^3$ на второй передаче. На первой передаче объем призмы волочения сохраняется таким же, как и при работе на второй передаче.

При разработке слабого грунта объем призмы волочения на первых четырех передачах меняется несущественно $q = 3,35 - 3,42 \text{ м}^3$, уменьшаясь только на пятой передаче.

Такой характер изменения призмы волочения от касательного тягового усилия P_k объясняется ограничениями, которые накладывают размеры отвала.

В результате эксперимента получены значения технической производительности исследуемого бульдозерного агрегата при его работе на разных передачах в разных грунтовых условиях.

Деление тяговых усилий P_k на вес бульдозерного агрегата $G_a = 160,9$ кН позволило перейти к удельным тяговым усилиям $\varphi_a = P_k/G_a$ (табл. 3).

Таблица 3
Удельные тяговые усилия бульдозера
Table 3
Potential traction characteristics of the basic tractor

Передача	I	II	III	IV	V
Тяговое усилие P_k , кН	154	127	108	90,1	70,8
Удельное тяговое усилие φ_a	0,96	0,79	0,67	0,56	0,44

Полученная зависимость технической производительности Π от удельного тягового усилия φ_a (рис. 2) имеет ярко выраженный максимум, что подтверждается ранее проведенными теоретическими исследованиями [25].

При работе на плотном грунте максимальная производительность $\Pi = 128 \text{ м}^3/\text{час}$ получена при работе на второй передаче ($\varphi_a = 0,79$). При бульдозировании на первой передаче производительность резко падает до $\Pi = 105 \text{ м}^3/\text{час}$. Работа на III–V передачах сопровождается постепенным снижением производительности до $\Pi = 113 \text{ м}^3/\text{час}$, что составляет всего 88 % от ее максимума.

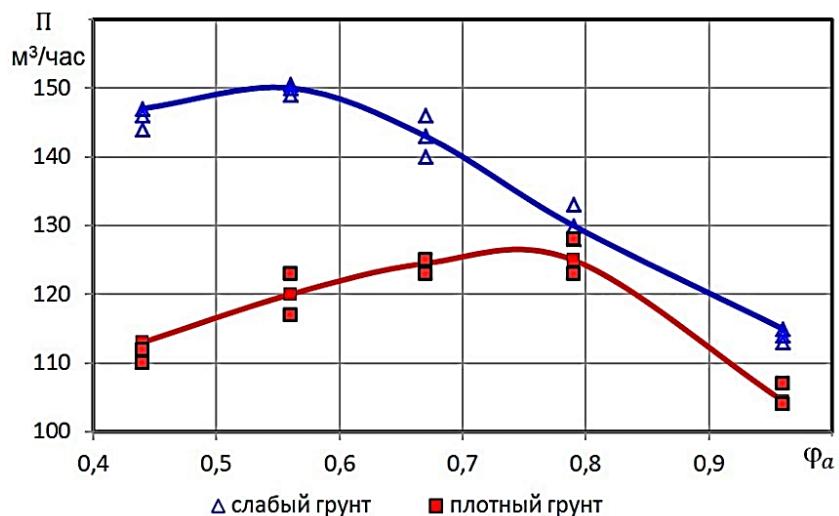


Рис. 2. Зависимость технической производительности Π от удельного тягового усилия φ_a

Fig. 2. Dependence of technical productivity Π on specific traction force φ_a

На слабом грунте производительность выше, чем при работе на плотном грунте. Максимум производительности (по сравнению с работой на плотном грунте) смещается в сторону невысоких тяговых усилий. Наибольшая производительность $\Pi = 150 \text{ м}^3/\text{час}$ обеспечивается при работе на четвертой передаче. На I–III передачах производительность постепенно снижается, составляя на первой передаче всего 76 % своего максимального значения.

Заключение

Зависимость изменения объема призмы волочения от касательных тяговых усилий имеет вначале линейную зависимость, а потом происходит ее стабилизация, объясняемая ограничениями от размеров отвала.

Зависимость технической производительности бульдозерного агрегата от удельных тяговых усилий имеет ярко выраженный максимум, который при разработке плотного грунта наблюдается при работе на второй передаче, а при разработке слабого грунта – при работе на четвертой передаче.

Список литературы

1. Syromyatnikov Yu. et al. Productivity of Tillage Loosening and Separating Machines in an Aggregate with Tractors of Various Capacities // Journal of Terramechanics. 2021. Vol. 98. P. 1–6. DOI: 10.1016/j.jterra.2021.09.002
2. Позин Б.М., Трояновская И.П. Тяговая характеристика трактора (основы теории и расчет). Челябинск: ЮУрГУ, 2016. 84 с.
3. Kozbagarov R. et al. Increasing the efficiency of the bulldozer by reducing the energy intensity of the soil cutting process // The Bulletin of KazATC. 2023. Vol. 1 (124). P. 16–24. DOI: 0.52167/1609-1817
4. Кутьков Г.М. Энергонасыщенность и классификация тракторов // Тракторы и сельхозмашины. 2009. № 5. С. 11–14.
5. Ali K. et al. A Comprehensive Review of Bulldozers in Modern Construction // Journal of Scientific Research and Reports. 2023. Vol. 30(5). P. 337–342. DOI: 10.9734/JSRR/2024/v30i51949
6. Кутьков Г.М. Развитие технической концепции трактора // Тракторы и сельхозмашины. 2019. № 1. С. 27–35.
7. Shepelev S.D. et al. Theoretical and experimental studies of the tractive resistance of the sowing complex for the no-till technology // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2023. P. 341–350. DOI: 10.1007/978-3-031-14125-6_34
8. ГОСТ 19677-87 Тракторы сельскохозяйственные. Общие технические условия. М.: Госстандарт. С. 7
9. Баловнев В.И., Данилов Р.Г. Бульдозеры // Строительные и дорожные машины. 2021. № 6. С. 9–18.
10. ГОСТ 27434-87 Тракторы промышленные. Общие технические условия. М.: Госстандарт. С. 9.
11. Dolmatov S. et al. Improving the efficiency of bulldozer rippers and excavators by CAD, CAE engineering methods // AIP Conference Proceedings. 2024. Vol. 3154 (1), no. 020014. DOI: 10.1063/5.0201344
12. Suleev B., Kurmasheva B. Theoretical foundations of the development of a bulldozer design through the use of multivariate parametric analysis // The Bulletin of KazATC. 2023. Vol. 126(3). P. 74–81. DOI: 10.52167/1609-1817
13. Lebedev A. et al. Determining conditions for providing maximum traction efficiency of tractor as part of a soil tillage unit // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 127(1). P. 6–14. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.297902
14. Dobretsov R. et al. Kinematic and force patterns of interaction of a link caterpillar of a transport machine with the ground // FME Transactions. 2023. Vol. 51(3). P. 415–422. DOI: 10.5937/fme2303415D
15. Ulanov A.G. et al. Optimization of gear ratio of stepless mechanical gearboxes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 537, no. 032007. DOI: 10.1088/1757-899X/537/3/032007
16. Dobretsov R.Yu. et al. The method of expert assessments as applied to the ranking of technical solutions in the design of a tractor gearbox // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2094. no. 042028. DOI: 10.1088/1742-6596/2094/4/042028
17. Жулай В.А., Тюнин В.Л., Щиенко А.Н. Влияние технических характеристик бульдозера на его производительность // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 2. С. 534–537. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-2-534-535
18. Розенфельд Н.В., Доля Ю.А. Нагрузки, действующие на бульдозер при транспортировке грунта // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2014. № 65–66. С. 231–234
19. Мицын Г.П. и др. Проблемы оптимального управления тракторным машинным агрегатом // Наука и технологии. 2005. С. 510–519.
20. ГОСТ 10792-75 Бульдозеры гусеничные общего назначения. Правила приемки и методы испытаний. М.: Госстандарт. С. 30.

21. Аукенова Б.К. и др. Исследование рабочего процесса бульдозерного отвала с изменяющейся геометрией // Труды университета. 2023. № 2 (91). С. 67–73. DOI: 10.52209/1609-1825_2023_2_67
22. Хұжаназаров Б.Ф. Требования к рабочим органам бульдозерных оборудований // Механика и технология. 2023. № 2 (5). С. 208–214.
23. Zhakov A. O. et al. Method for calculating the limiting shear force deviating from a given direction of movement using the example of the B12 bulldozer // Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2022. P. 779–787. DOI: 10.1007/978-3-031-14125-6_76
24. Nikolaev V. et al. Calculation of energy expenses for moving soil by the conveyor of the unit for tunneling // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 471, no. 05006. DOI: 10.1051/e3sconf/202447105006
25. Троицкая И.П., Гребенщикова О.А. Оптимизация технической производительности бульдозерного агрегата по тягово-скоростным параметрам // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-6

References

1. Syromyatnikov Yu. et al. Productivity of Tillage Loosening and Separating Machines in an Aggregate with Tractors of Various Capacities. *Journal of Terramechanics*, 2021; 98: 1–6. DOI: 10.1016/j.jterra.2021.09.002
2. Pozin B.M., Troyanovskaya I.P. *Tyagovaya kharakteristika traktora (osnovy teorii i raschet)* [Tractor traction characteristics (theory basics and calculation)]. Chelyabinsk, 2016. 84 p.
3. Kozbagarov R. et al. Increasing the efficiency of the bulldozer by reducing the energy intensity of the soil cutting process. *The Bulletin of KazATC*, 2023; 1 (124): 16–24. DOI: 0.52167/1609-1817
4. Kutkov G.M. [Energy saturation and classification of tractors]. *Tractors and agricultural machinery*, 2009; 5: 11–14. (In Russ.)
5. Ali K. et al. A Comprehensive Review of Bulldozers in Modern Construction. *Journal of Scientific Research and Reports*, 2023; 30(5): 337–342. DOI: 10.9734/JSRR/2024/v30i51949
6. Kutkov G.M. [Development of the technical concept of the tractor]. *Tractors and agricultural machinery*, 2019; 1: 27–35. (In Russ.)
7. Shepelev S.D. et al. Theoretical and Experimental Studies of the Tractive Resistance of the Sowing Complex for the NO-TILL Technology. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2023: 341–350. DOI: 10.1007/978-3-031-14125-6_34
8. GOST 19677-87 *Traktory sel'skokhozyaystvennyye. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya*. [State standard 19677-87 Agricultural tractors. General specifications]. Moscow: Gosstandart: 7
9. Balovnev V., Danilov R. [Bulldozers] *Construction and road machines*, 2021; 6: 9–18. (In Russ.)
10. GOST 27434-87 *Traktory promyshlennyye. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya* [State standard 27434-87 Industrial tractors. General specifications]. Moscow: Gosstandart. P. 9
11. Dolmatov S. et al. Improving the efficiency of bulldozer rippers and excavators by CAD, CAE engineering methods. *AIP Conference Proceedings*, 2024; 3154(1): 020014. DOI: 10.1063/5.0201344
12. Suleev B., Kurmasheva B. Theoretical foundations of the development of a bulldozer design through the use of multivariate parametric analysis. *The Bulletin of KazATC*, 2023; 126(3): 74–81. DOI: 10.52167/1609-1817
13. Lebedev A. et al. Determining conditions for providing maximum traction efficiency of tractor as part of a soil tillage unit. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2024; 127(1): 6–14. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.297902
14. Dobretsov R. et al. Kinematic and Force Patterns of Interaction of a Link Caterpillar of a Transport Machine with the Ground. *FME Transactions*, 2023; 51(3): 415–422. DOI: 10.5937/fme2303415D
15. Ulanov A.G. et al. Optimization of Gear Ratio of Stepless Mechanical Gearboxes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019; 537. no. 032007. DOI: 10.1088/1757-899X/537/3/032007
16. Dobretsov R.Yu. et al. The Method of Expert Assessments as Applied to the Ranking of Technical Solutions in the Design of a Tractor Gearbox. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021; 2094. no. 042028. DOI: 10.1088/1742-6596/2094/4/042028

17. Zhulai V.A., Tyunin V.L., Shchienko A.N. [Influence of technical characteristics of a bulldozer on its productivity] *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU)*. 2024; 2: 534–537. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-2-534-535 (In Russ.)
18. Rozenfeld N., Dolya Yu. [Loads acting on a bulldozer at soil transportation] *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*, 2014; 65–66: 231–234. (In Russ)
19. Mitsyn G.P. et al. [Problems of optimal control of a tractor machine unit] *Science and Technology*, 2005: 510–519. (In Russ.).
20. GOST 10792-75 Bul'dozery gusenichnyye obshchego naznacheniya. Pravila priyemki i metody ispytaniy [State standard 10792-75 General-purpose crawler bulldozers. Acceptance rules and testing methods]. Moscow: Gosstandart. P. 30. (In Russ.)
21. Aukenova B.K. et al. Investigation of the Interaction Process with the Environment of a Bulldozer Bladow with Variable Geometry. *Universitet Enbekteri – University Proceedings*. 2023; 2 (91): 67–73. DOI: 10.52209/1609-1825_2023_2_67
22. Khozhanazarov B.F. [Requirements for working bodies of bulldozer equipment] *Mechanics and Technology*, 2023; 2 (5): 208–214. (In Russ.)
23. Zhakov A. O. et al. Method for calculating the limiting shear force deviating from a given direction of movement using the example of the B12 bulldozer. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2022: 779–787. DOI: 10.1007/978-3-031-14125-6_76
24. Nikolaev V. et al. Calculation of Energy Expenses for Moving Soil by the Conveyor of the Unit for Tunneling. *E3S Web of Conferences*, 2024; 471. no. 05006. DOI: 10.1051/e3sconf/202447105006
25. Troyanovskaya I.P., Grebenschikova O.A. Optimization of technical productivity of a bulldozer unit in terms of traction and speed parameters. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (6): DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-6 (In Russ.)

Информация об авторах

Троицкая Ирина Павловна, доктор технических наук, профессор, кафедра «Тракторы, сельскохозяйственные машины и земледелие», Южно-Уральский государственный аграрный университет, Троицк, Россия; tripav63@mail.ru

Гребенщикова Ольга Александровна, кандидат технических наук, кафедра «Тракторы, сельскохозяйственные машины и земледелие», Южно-Уральский государственный аграрный университет, Троицк, Россия; olgai3@mail.ru

Абызов Алексей Александрович, доктор технических наук, доцент, кафедра «Техническая механика», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; abyzovaa@susu.ru

Information about the authors

Irina P. Troyanovskaya, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Tractors, Agricultural Machinery and Agriculture, South Ural State Agrarian University, Troitsk, Russia; tripav63@mail.ru

Olga A. Grebenschikova, Candidate of Engineering Sciences, Department of Tractors, Agricultural Machinery and Agriculture, South Ural State Agrarian University, Troitsk, Russia; olgai3@mail.ru

Aleksey A. Abyzov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technical Mechanics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; abyzovaa@susu.ru

Статья поступила в редакцию 18.03.2025; принята к публикации 28.03.2025.

The article was submitted 18.03.2025; accepted for publication 28.03.2025.