

Научная статья
УДК 621.879
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-844-851>
EDN: LMLPVY



ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ БУЛЬДОЗЕРНОГО АГРЕГАТА ПО ТЯГОВО-СКОРОСТНЫМ ПАРАМЕТРАМ

И.П. Трояновская^{1,2}, О.А. Гребенщикова¹ ✉

¹Южно-Уральский государственный аграрный университет,
г. Троицк, Россия

²Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет),
г. Челябинск, Россия

✉ ответственный автор
olgai3@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Промышленные тракторные агрегаты отличаются от сельскохозяйственных тракторных агрегатов большим весом рабочего оборудования, широким диапазоном грунтовых условий и циклическостью технологического цикла. Неотъемлемой частью работы бульдозерных агрегатов является буксование, не регламентируемое ГОСТ. Однако значительное буксование приводит к падению рабочей скорости и технической производительности. Поэтому подходы, выработанные для оптимизации производительности гусеничных сельскохозяйственных тракторных агрегатов (где буксование регламентируется на уровне 5%), требуют уточнения.

Цель исследования. Определить влияние удельных тягово-скоростных характеристик бульдозерного агрегата на его техническую производительность.

Материалы и методы. Техническая производительность определялась как отношение объема разработанного грунта ко времени рабочего цикла. Объем разработанного грунта был выражен через удельные тяговые параметры тракторного агрегата. Время рабочего цикла выражалось через скоростные параметры тракторного агрегата. В результате получена зависимость технической производительности от удельных тягово-скоростных параметров промышленного тракторного агрегата.

Результаты. Анализ полученной зависимости показал наличие ярко выраженного максимума, который для бульдозерного агрегата наблюдается при буксовании 18%. Определены оптимальные удельные тяговые усилия для различных грунтовых условий. Оценка скоростных показателей бульдозерного агрегата показала возможность дополнительного увеличения технической производительности за счет роста рабочей скорости.

Заключение. Получен коэффициент производительности, позволяющий сравнивать техническую производительность тракторных агрегатов различных классов. Выявлено, что для бульдозерных агрегатов с полужесткой подвеской, работающих на плотных грунтах, оптимальные удельные тяговые усилия составляют 0,75...0,89. Дальнейшее повышение технической производительности возможно за счет увеличения рабочей скорости, обязательной при сохранении (или увеличении) отношения скорости холостого хода к скорости рабочего хода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: землеройная машина, удельные тяговые усилия, разработка грунта, призма волочения, кавальер, рабочая скорость, откат

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Трояновская И.П. – член редакционной коллегии журнала «Вестник СибАДИ». Журнал «Вестник СибАДИ» не освобождает от рецензирования рукописи ученых вне зависимости от их статуса.

Статья поступила в редакцию 23.09.2024; одобрена после рецензирования 28.10.2024; принята к публикации 16.12.2024.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

© Трояновская И.П., Гребенщикова О.А., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Трояновская И.П., Гребенщикова О.А. Оптимизация технической производительности бульдозерного агрегата по тягово-скоростным параметрам // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 844-851. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-844-851>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-844-851>

EDN: LMLPVY

OPTIMIZATION OF TECHNICAL PRODUCTIVITY OF A BULLDOZER UNIT IN TERMS OF TRACTION AND SPEED PARAMETERS

Irina P. Troyanovskaya¹, Olga A. Grebenshchikova¹ ✉

¹South Ural State Agrarian University,
Troitsk, Russia

South Ural State University (national research university),
Chelyabinsk, Russia

✉ corresponding author
olgai3@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Industrial tractor units differ from agricultural tractor units by the greater weight of the working equipment, a wide range of soil conditions and the cyclicity of the technological cycle. An integral part of the operation of bulldozer units is slippage, which is not regulated by GOST. However, large amounts of slippage result in a drop in operating speed and technical performance. Therefore, the approaches developed for optimizing the productivity of tracked agricultural tractor units (where slippage is regulated at 5%) require clarification.

The aim of the study is to determine the influence of specific traction-speed characteristics of a bulldozer unit on its technical productivity.

Materials and methods. Technical productivity was defined as the ratio of the volume of developed soil to the time of the working cycle. The volume of developed soil was expressed through the specific traction indicators of the tractor unit. The time of the working cycle was expressed through the speed indicators of the tractor unit. As a result, the dependence of technical productivity on the specific traction-speed indicators of the industrial tractor unit was obtained.

Results. The analysis of this dependence showed the presence of a clearly expressed maximum, which for the bulldozer unit is observed at 18% slippage. Optimal specific traction efforts for various soil conditions were determined. The evaluation of the speed indicators of the bulldozer unit showed the possibility of additional increase in technical productivity due to the growth of the operating speed.

Conclusions. A productivity coefficient has been obtained that allows comparing the technical indicators of tractor units of different classes. It has been established that for bulldozer units with a semi-rigid suspension, operating on dense soils, the optimal specific traction efforts are 0.75...0.89. Further increase in technical productivity is possible by increasing the working speed while maintaining (or increasing) the ratio of idle speed to working speed.

KEYWORDS: earthmoving machine, specific traction effort, soil development, drag prism, cavalier, working speed, rollback

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest. Troyanovskaya I.P. member of the editorial board of the journal *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. The journal "The Russian Automobile and Highway Industry Journal" does not exempt scientists from reviewing the manuscript, regardless of their status.

The article was submitted: 23.09.2024; approved after reviewing: 28.10.2024; accepted for publication: 16.12. 2024.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Troyanovskaya I.P., Grebenshchikova 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): 844-851. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-844-851>

© Troyanovskaya I.P., Grebenshchikova O.A., 2024



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Около 30% общего объема земляных работ в нашей стране выполняется землеройными агрегатами на базе гусеничных тракторов [1]. Наибольшее распространение получили промышленные тракторные агрегаты в составе с бульдозерным и рыхлительным рабочим оборудованием. Они уже давно доказали свою незаменимость при строительстве каналов и гидроэлектростанций; шоссейных и железных дорог; добыче полезных ископаемых; при сооружении различных промышленных и гражданских объектов; прокладке магистральных нефте- и газопроводов; при освоении Арктики [2].

Важнейшим отличием промышленных тракторных агрегатов¹ является циклический характер их технологического процесса [3]. Значительную часть технологического цикла (30% для бульдозера и 20% для рыхлителя) составляет холостой ход (откат). При этом рабочий и холостой ход характеризуются различной загрузкой двигателя. В период рабочего хода средняя нагрузка двигателя составляет 75–85% его номинальной мощности, а на холостом ходу она находится на уровне 20–30% [4].

Еще одной отличительной чертой тракторных агрегатов промышленного назначения является значительный вес рабочего оборудования. Например, вес бульдозерного агрегата превышает вес базового трактора на 17–22%. Дополнительная установка рыхлительного оборудования приводит к увеличению веса агрегата в 1,3–1,5 раза по сравнению с базовым трактором [5].

В отличие от сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов диапазон грунто-вых условий промышленных агрегатов значительно шире (от снежного покрова до мерзлых грунтов). В связи с этим подходы, выработанные для оптимизации производительности сельскохозяйственных тракторных агрегатов, требуют уточнения.

Цель исследования: определить влияние удельных тягово-скоростных характеристик бульдозерного агрегата на его техническую производительность.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Техническая производительность любого тракторного агрегата циклического действия (включая бульдозер) определяется по формуле [6, 7]:

$$\Pi = q/T, \quad (1)$$

где q – объем разработанного грунта (призмы волочения); T – время рабочего цикла.

Свяжем объем призмы волочения q с удельным тяговым усилием бульдозерного агрегата $\varphi_a = P_{кр}/G_a$, где $P_{кр}$ – крюковое тяговое усилие; G_a – вес бульдозерного агрегата.

Согласно тяговому балансу развиваемое бульдозерным агрегатом крюковое тяговое усилие равно $P_{кр} = P_k - P_f$, где $P_k = \varphi G_a$ – касательное тяговое усилие, φ – коэффициент сцепления гусеницы с грунтом, $P_f = f G_a$ – сила сопротивления самопередвижению бульдозерного агрегата, f – коэффициент сопротивления самопередвижению.

Крюковое тяговое усилие должно обеспечивать тяговое сопротивление P_{Σ} при разработке грунта траншейным способом [8]:

$$P_{\Sigma} = P_p + P_t + P_a, \quad (2)$$

где P_p – сопротивление резанию грунта, P_t – сопротивление перемещению призмы волочения по кавальеру, P_a – сопротивление движению грунта вверх по отвалу.

Сопротивление резанию грунта можно определить по $P_p = kF$, где k – коэффициент сопротивления грунта резанию; F – площадь сечения срезаемой стружки [9].

Сопротивление перемещению призмы волочения по кавальеру равно $P_t = \mu_1 G_q$, где μ_1 – коэффициент трения грунта по грунту; $G_q = \gamma q$ – вес призмы волочения; γ – удельный вес грунта [10].

Сопротивление движению грунта по отвалу равно $P_a = \mu_2 G_q \cos^2 \alpha$, где μ_2 – коэффициент трения грунта по металлу отвала; $\alpha \approx 55^\circ$ – угол резания отвала.

Тогда формула суммарного сопротивления (2) принимает вид [11, 12]:

$$P_{\Sigma} = P_p + P_t + P_a, \quad (3)$$

где $\mu = \mu_1 + \mu_2 \cos^2 \alpha$ – эквивалентный коэффициент трения.

Приравняв суммарное тяговое сопротивление P_{Σ} к крюковому тяговому усилию $P_{кр}$, получаем его связь с призмой волочения

$$kF + \mu \gamma q = \varphi_a G_a. \quad (4)$$

¹ Гинзбург Ю.В. [и др.]. Промышленные тракторы. М: Машиностроение, 1986. 296 с.

Объем призмы волочения q зависит от площади сечения срезаемого грунта F . Приращение призмы волочения dq на участке dx можно записать

$$dq(x) = Fdx. \tag{5}$$

Выразим из (4) площадь срезаемого грунта $F = \frac{\varphi_a G_a - \mu \gamma q}{k}$ и подставим его в (5):

$$dq(x) = \frac{\varphi_a G_a - \mu \gamma q(x)}{k} dx. \tag{6}$$

Проинтегрируем выражение (6) с учетом $x = 0 \dots l_n$, где l_n – длина траншеи, где происходит набор грунта (при $x = 0, q = 0$).

$$q = \frac{\varphi_a}{\mu \gamma} \left[1 - e^{-\frac{\mu \gamma l_n}{k}} \right] G_a. \tag{7}$$

Теперь выразим время рабочего цикла T через скоростные параметры бульдозерного агрегата. Время цикла складывается из времени на набор грунта T_n , его транспортировку $T_{тр}$, холостой ход T_{xx} и переключение передач $T_{пп}$:

$$T = T_n + T_{тр} + T_{xx} + T_{пп}. \tag{8}$$

Время на набор грунта определяется $T_n = l_n / V_p c_1 (1 - \delta)$, где V_p – теоретическая рабочая скорость бульдозера при наборе грунта; δ – коэффициент буксования на рабочем ходе; c_1 – коэффициент потери скорости на рабочем ходе, учитывающий работу двигателя на перегрузочных режимах при резком снижении оборотов.

Время на транспортировку грунта равно $T_{тр} = l_t / V_p c_1 (1 - \delta)$, где $l_t = l_k - l_n$ – путь транспортировки грунта по кавальеру; l_k – длина кавальера.

Время холостого хода $T_{xx} = l_{xx} / c_2 V_{xx}$, где $l_{xx} = l_k$ – путь отката (длина кавальера); V_{xx} – рабочая скорость заднего хода; c_2 – коэффициент потери скорости движения при откате трактора из-за неустановившегося движения.

Время переключения передач $T_{пп}$ практически не зависит от параметров бульдозерного агрегата и определяется в основном квалификацией оператора. Его величина составляет всего 0,03 от общего времени цикла [13], что позволяет пренебречь в дальнейшем этой составляющей в связи с ее относительной малостью.

Тогда общее время рабочего цикла (8), после небольших преобразований получаем

$$T = \frac{l_k}{V_p c_1} \left(\frac{1}{1 - \delta} + \frac{c_1 V_p}{c_2 V_{xx}} \right). \tag{9}$$

Подставив (7) и (9) в (1) получим выражение для технической производительности бульдозерного агрегата в зависимости от его тягово-скоростных параметров

$$\Pi = \frac{\varphi_a \left[1 - e^{-\frac{\mu \gamma l_n}{k}} \right] V_p c_1 G_a}{\mu \gamma l_k \left[\frac{1}{1 - \delta} + \frac{c_1 V_p}{c_2 V_{xx}} \right]}. \tag{10}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ формулы производительности (10) позволил выделить в ней коэффициент производительности K_n , характеризующий удельные тягово-скоростные параметры бульдозерного агрегата при равных грунтовых условиях $\mu \gamma$ и длине разрабатываемой траншеи l_k :

$$K_n = \frac{\varphi_a V_p c_1}{\left[\frac{1}{1 - \delta} + \frac{c_1 V_p}{c_2 V_{xx}} \right]}. \tag{11}$$

Оценим влияние удельных тяговых параметров на техническую производительность. Для этого выразим удельное крюковое усилие φ_a как функцию буксования δ (рисунок 1).

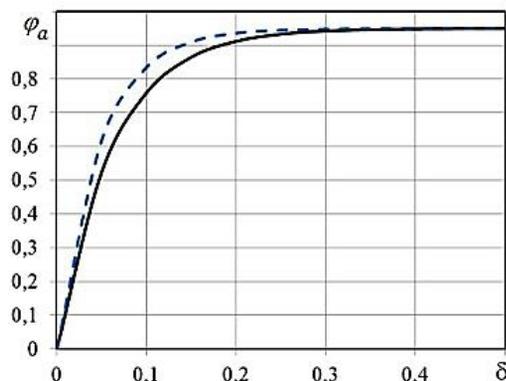


Рисунок 1 – Зависимость удельного крюкового усилия φ_a от коэффициента буксования δ
 Источник: открытые электронные ресурсы.

Figure 1 – Dependence of the specific hook force φ_a on the slip coefficient δ
 Source: open electronic resources.

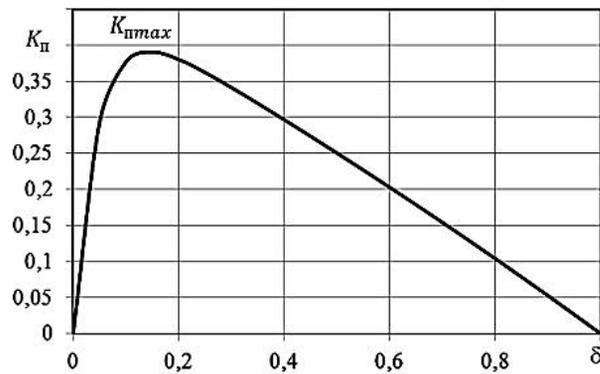


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента производительности $K_{п}$ от буксования δ
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Dependence of the performance coefficient $K_{п}$ on slippage δ
Source: compiled by the authors.

Таблица
Оптимальные удельные тяговые усилия φ_{aopt} , обеспечивающие максимальную техническую производительность бульдозерного агрегата
Источник: составлено авторами.

Table
Optimal specific traction forces φ_{aopt} , ensuring maximum technical productivity of the bulldozer unit
Source: compiled by the authors.

φ_{max}	0,8	0,85	0,9	0,95
$K_{пmax}$	0,31	0,33	0,35	0,36
φ_{aopt}	0,75	0,80	0,85	0,89

Зависимость $\varphi_a(\delta)$ достаточно точно описывается зависимостью [14, 15]:

$$\varphi = \varphi_{max} [1 - (1 - \delta)e^{a\delta}], \quad (12)$$

где $\varphi_{max} \approx 0,8 \dots 0,95$ – максимальное значение удельного крюкового усилия гусеничного движителя с грунтом; $a \approx -15$ – коэффициент деформируемости грунта, определяемый экспериментально².

Коэффициент производительности в функции от буксования $K_{п}(\delta)$ имеет ярко выраженный максимум (рисунок 2) при буксовании $\delta = 0,18$.

Коэффициент максимальной производительности $K_{п}$ позволяет для заданных грунтовых условий определить оптимальные

крюковые тяговые усилия φ_{aopt} . Результаты расчетов представлены в таблице.

Теперь оценим влияние скоростных параметров на техническую производительность. Согласно исследованиям Б.Л. Магарилло³ коэффициенты потерь скорости на рабочем и холостом ходу при работе бульдозерного агрегата составляют $c_1 = 0,85 \dots 0,9$ и $c_2 = 0,92 \dots 0,97$

Определим влияние скоростных параметров на техническую производительность. Для бульдозерного агрегата с полужесткой подвеской рекомендуемые скоростные диапазоны составляют: для скорости отката $V_{xx} = 10 \dots 12$ км/ч (2,8...3,3 м/с), для рабочей скорости $V_p = 2,5 \dots 4$ км/ч (0,7...1,1 м/с) [16]. Результаты расчетов представлены на рисунке 3.

² Позин Б.М., Трояновская И.П. Тяговая характеристика трактора (основы теории и расчет). Челябинск. 2016. 84 с.

³ Магарилло Б.Л. Исследование оптимальных тяговых усилий гусеничного промышленного трактора. дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 1970. 122 с.

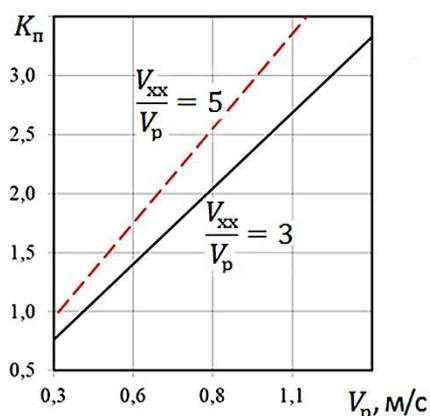


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента производительности K_n от рабочей скорости V_p и соотношения скорости холостого хода и рабочего хода V_{xx}/V_p
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Dependence of the performance coefficient K_n on the operating speed V_p and the ratio of the idle and operating speeds V_{xx}/V_p
Source: compiled by the authors.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа бульдозерного агрегата характеризуется: цикличностью технологического процесса, включающего рабочий и холостой ход; большим весом рабочего оборудования; накоплением грунта при его разработке; широким диапазоном действующих нагрузок и типов грунтов.

Получен удельный коэффициент производительности, позволяющий сравнивать техническую производительность тракторных агрегатов различных классов.

Анализ технической производительности бульдозерного агрегата показал, что она имеет ярко выраженный максимум в зависимости от величины буксования, что позволяет определить оптимальные значения удельных тяговых усилий на рабочем ходу в зависимости от типа грунта. В результате численного эксперимента определено, что при работе на плотных грунтах (с максимальным коэффициентом сцепления $\varphi_{\max} = 0,8 \dots 0,95$) оптимальные удельные тяговые усилия для бульдозерного агрегата с полужесткой подвеской составляют $\varphi_{\text{опт}} = 0,75 \dots 0,89$.

Оценка скоростных показателей бульдозерного агрегата показала возможность дополнительного увеличения технической производительности за счет роста рабочей скорости. Чтобы рост производительности не отставал от роста рабочей скорости необходимо сохранять или увеличить отношение скорости холостого хода к скорости рабочего хода.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Баловнев В.И., Данилов Р.Г. Бульдозеры // Строительные и дорожные машины. 2021. № 6. С. 9–18.
2. Ермошин Н.А., Борисов В.А. Моделирование условий работы дорожно-строительных машин и технологического оборудования // Известия КГАСУ. 2024. № 2(68). С. 147–158. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.13.
3. 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). pp. 74–81. DOI: 10.52167/1609-1817
4. Bolotokov A.L. et al. Improving the Fuel Efficiency of an Agricultural Tractor Diesel Engine. E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 411. pp. 01045. DOI: 10.1051/e3sconf/202341101045
5. Хужаназаров Б.Ф. Требования к рабочим органам бульдозерных оборудований // Механика и технология. 2023. № 2 (5). С. 208–214.
6. 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
7. Трояновская И.П., Позин Б.М., Нарadowый Д.И. Повышение эффективности тракторного транспортного агрегата // Техника в сельском хозяйстве. 2012. № 3. С. 21–23.
8. Жаков А.О., Трояновская И.П. Учет сил со стороны рабочего орудия в управлении беспилотным тракторным агрегатом // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2024. № 13. С. 70–72. DOI: 10.26160/2541-8637-2024-13-70-72
9. Ауменова Б.К., Раденков Р.Л., Савельев А.Г., Дудкин М.В., Кумыкова Т.М. Исследование рабочего процесса бульдозерного отвала с изменяемой геометрией // Труды университета. 2023. № 2 (91). С. 67–73. DOI: 10.52209/1609-1825_2023_2_67
10. 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
11. 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). pp. 16–24. DOI: 0.52167/1609-1817
12. 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.
13. Мицын Г.П. [и др.]. Проблемы оптимального управления тракторным машинным агрегатом // Наука и технологии: избранные труды Российской школы «К 70-летию Г.П. Вяткина». 2005. С. 510–519.
14. Трояновская И.П. Взаимодействие гусеничного движителя с грунтом на повороте // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2007. № 12. С. 19–20.

15. Ren L. et al. Effects of non-smooth characteristics on bionic bulldozer blades in resistance reduction against soil. *Journal of Terramechanics*. 2002. Vol. 39 (4. pp. 221–230. DOI: 10.1016/S0022-4898(03)00012-0

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

REFERENCES

1. Balovnev V.I., Danilov R.G. Bulldozers. *Construction and road machines*. 2021; 6:9–18. (in Russ)

2. Ermoshin N.A., Borisov V.A. Modeling of working conditions and selection of sets of road-building machines and processing equipment. *News KSUAE*. 2024; 2(68): 147–158. (in Russ) DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.13

3. 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

4. Bolotokov A.L. et al. Improving the Fuel Efficiency of an Agricultural Tractor Diesel Engine. *E3S Web of Conferences*. 2023; 411: 01045. DOI: 10.1051/e3sconf/202341101045

5. Khuzhanazarov B.F. Requirements for working bodies of bulldozer equipment. *Mechanics & Technologies*. 2023; 2 (5): 208–214. (in Russ)

6. 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. (in Russ) DOI: 10.24412/2071-6168-2024-2-534-535

7. Troyanovskaya I.P., Pozin B.M., Naradoviy D.I. Increasing the efficiency of a tractor transport unit. *Machinery in agriculture*. 2012; 3: 21–23. (in Russ)

8. Zhakov A.O., Troyanovskaya I.P. Accounting for forces from the working implement in the control of an unmanned tractor unit. *Mechatronics, automation and robotics*. 2024; 13: 70–72. (in Russ) DOI: 10.26160/2541-8637-2024-13-70-72

9. Aukenova B.K. Radenkov R., Saveliev A., Doudkin M., Kumykova T. Investigation of the Interaction Process with the Environment of a Bulldozer Bladov with Variable Geometry. *Universitet Enbekteri – University Proceedings*. 2023; 2 (91): 67–73. DOI:10.52209/1609-1825_2023_2_67

10. 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

11. 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: 10.52167/1609-1817

12. 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.

13. Mitsyn G.P. et al. Problems of optimal control of a tractor machine unit. *Science and Technology: Selected Works of the Russian School “On the 70th anniversary of G.P. Vyatkin”*. 2005: 510–519. (in Russ)

14. Troyanovskaya I.P. Interaction of a caterpillar track with the ground on a turn. *Tractors and agricultural machinery*. 2007; 12: 19–20. (in Russ)

15. Ren L. et al. Effects of non-smooth characteristics on bionic bulldozer blades in resistance reduction against soil. *Journal of Terramechanics*. 2002; 39 (4): 221–230. DOI: 10.1016/S0022-4898(03)00012-0

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: 042028. DOI: 10.1088/1742-6596/2094/4/042028

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Трояновская И.П. Формулирование направления, выбор методологии исследования, вывод формул, проведение численных расчетов, полученные результаты.

Гребенщикова О.А. Общая организация работы, подготовка текста статьи, перевод на английский язык, связь с редакцией, работа с рецензентами.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Troyanovskaya I.P. Formulating the direction, choosing the research methodology, deriving formulas, performing numerical calculations, obtaining results.

Grebenshchikova O.A. General organization of work, preparation of article text, translation into English, communication with the editorial board, work with reviewers.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Трояновская Ирина Павловна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Тракторы, сельскохозяйственные машины и земледелие» Южно-Уральского государственного аграрного университета (457103, г. Троицк, ул. Гагарина, 13); проф. кафедры «Колесные и гусеничные машины» Южно-Уральского государственного университета (национальный исследовательский университет) (454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2763-0515>,

SPIN-код: 8733-7935,

e-mail: tripav63@mail.ru

Гребенщикова Ольга Александровна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Тракторы, сельскохозяйственные машины и земледелие» Южно-Уральского государственного аграрного университета (457103, г. Троицк, ул. Гагарина, 13).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5941-211X>,

SPIN-код: 6012-9906,

e-mail: olgai3@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Troyanovskaya Irina P. – Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Professor of the Department of Tractors, Agricultural Machinery and Agriculture of the South Ural State Agrarian University (13 Gagarin Street, Troitsk, 457103); South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia.

ORGID: <https://orcid.org/0000-0003-2763-0515>,

SPIN-code: 8733-7935,

e-mail: tripav63@mail.ru

Grebenshchikova Olga A. – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Tractors, Agricultural Machinery and Agriculture of the South Ural State Agrarian University (13 Gagarin Street, Troitsk, 457103).

ORGID: <https://orcid.org/0000-0002-5941-211X>,

SPIN-code: 6012-9906,

e-mail: olgai3@mail.ru