

РАБОЧЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ БУЛЬДОЗЕРА С УШИРИТЕЛЯМИ**А.Б. Летопольский**

ORCID: 0000-0003-3503-131X e-mail: Antooooon-85@mail.ru

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет

Омск, Россия

И.А. Тетерина

ORCID: 0000-0001-8012-8511 e-mail: iateterina@mail.ru

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет

Омск, Россия

Предложена новая конструкция рабочего органа бульдозера с уширителями, представлены ее общий вид и параметры. Приведены расчетные схемы для определения сопротивления копания грунта отвалом и для определения призмы волочения отвала с уширителями. Результаты теоретических исследований процесса копания грунта модернизированным бульдозерным оборудованием отражены в виде графических зависимостей. Выведены зависимости силы копания от ширины и высоты рабочего органа, толщины срезаемой стружки и категории грунта. Определена производительность и удельная энергоемкость бульдозера со стандартным и модернизированным рабочим оборудованием в зависимости от дальности транспортирования грунта.

Ключевые слова: строительно-дорожная машина; бульдозер; рабочий орган; отвал; разработка грунта; прокладка магистральных трубопроводов; земляные работы; полусферический отвал.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Летопольский, А.Б. Рабочее оборудование бульдозера с уширителями / А.Б. Летопольский, И.А. Тетерина // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2026. № 2. С. 96-106. EDN XJCSIW

**BULLDOZER WORKING EQUIPMENT
WITH WIDENING ATTACHMENTS****A.B. Letopolsky**

ORCID: 0000-0003-3503-131X e-mail: Antooooon-85@mail.ru

Siberian State Automobile and Highway University

Omsk, Russia

I.A. Teterina

ORCID: 0000-0001-8012-8511 e-mail: iateterina@mail.ru

Siberian State Automobile and Highway University

Omsk, Russia

Abstract. This article presents the design of a bulldozer working tool with widening attachments, including its general view and parameters. Calculation schemes are given for determining the soil digging resistance of a blade and for determining the drag prism of the blade with widening attachments. The results of theoretical studies of the process of soil digging using modernized bulldozer blade are reflected in the form of graphical dependencies. The dependences of digging force on the width and height of the working tool, the thickness of the cut chips and the soil category are derived. The productivity and specific energy consumption of a bulldozer with standard and modernized working tool were determined depending on the distance of soil transportation.

Key words: road construction machine; bulldozer; working tool; blade; soil development; laying of main pipelines; earthworks; hemispherical blade.

FOR CITATION: A.B. Letopolsky, I.A. Teterina. Bulldozer working equipment with widening attachments. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 2. Pp. 96-106. EDN XJCSIW

Введение

Показателем научно-технического прогресса в области строительства является внедрение в производство принципиально новых, более мощных и производительных машин, работающих на основе современных технических эффектов. Но реализация технических решений, направленных на внедрение в серийное производство, при сегодняшней экономической конъюнктуре существенно замедлилась, поэтому необходимо на стадии проектирования просчитывать не только положительный эффект, но и стоимость как самой машины, так и ее рабочего оборудования [1]. Развитие эффективной землеройной техники идет по двум основным направлениям: совершенствование традиционных рабочих органов и машин, находящихся в эксплуатации, а также создание принципиально новых конструкций на основе последних достижений фундаментальной науки [2]. Машиностроение остро нуждается в такой строительной-дорожной технике для прокладки трубопроводов. Бульдозер считается одной из самых эффективных и универсальных машин землеройно-транспортного типа, способной выполнять задачи по срезке, планировке и перемещению грунта [3, 4].

На сегодняшний день в России при проведении земляных работ преимущественно задействованы бульдозеры импортного производства. Несмотря на их высокую эксплуатационную надежность, по своей конструкции они незначительно отличаются от отечественных аналогов. Для успешной реализации актуальной политики импортозамещения необходима разработка новых оригинальных конструкций, обладающих как новизной, так и высокой эффективностью при выполнении разнообразных земляных работ [5].

Функционал бульдозера, основной землеройно-транспортной машины, можно разделить на основные и вспомогательные операции. К основным относятся разработка, срезка и перемещение грунта, вскрышные работы на месторождениях и добыча полезных ископаемых открытым способом. Вспомогательные функции включают в себя выравнивание и планировку поверхностей, засыпку траншей и котлованов, строительство подъездных путей, а также расчистку территорий от пней, камней и валунов [6]. Общее время использования бульдозеров по видам работ [6] представлено на рис. 1.

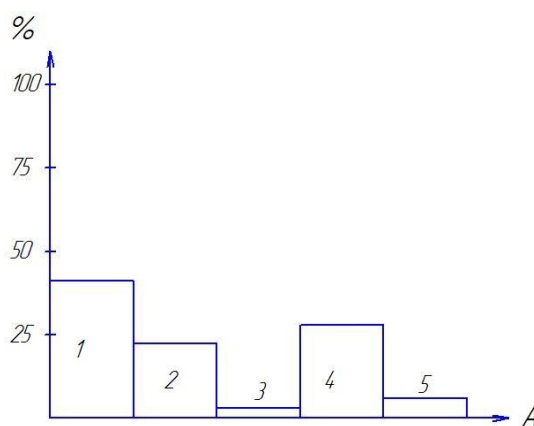


Рис. 1. Общее время использования бульдозера по видам работ:

- 1 – разработка и перемещение грунта (41 %); 2 – снятие и перемещение растительного слоя (22 %);
3 – перемещение скальных пород (3 %); 4 – очистка территорий (28 %);
5 – устройство уступов, засыпка ям и траншей, планировочные работы (6 %)

Fig. 1. Total bulldozer usage time by type of work:

- 1 – soil development and movement (41 %); 2 – removal and movement of topsoil (22 %);
3 – rock movement (3 %); 4 – site clearing (28 %);
5 – bench construction, backfilling of pits and trenches, grading work (6 %)

Анализируя приведенную зависимость, можно сделать вывод, что на основных работах (копание и перемещение грунта) бульдозер занят 66 % от общего времени его использования. Учитывая, что работы, связанные с очисткой территории, тоже можно отнести к разработке

грунта, общее время использования бульдозера на копание грунта составит более 70 %. Известно, что бульдозеры способны перемещать грунт на расстояние до 150 м, однако анализ работы современных гусеничных бульдозеров показал, что экономически целесообразная дальность транспортирования составляет до 50 м. На рис. 2 изображена гистограмма зависимости распределения объемов бульдозерных работ от дальности перемещения грунта [7, 8].

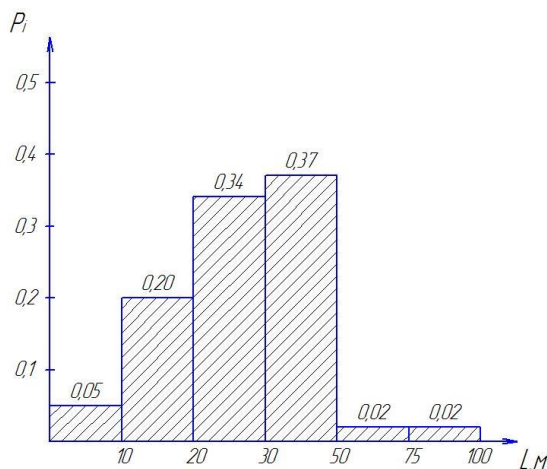


Рис. 2. Распределение объемов работ от дальности перемещения грунта бульдозером

Fig. 2. Distribution of work volumes by bulldozer movement distance

Анализ гистограммы дальности перемещения грунта бульдозером показал, что средняя дальность перемещения грунта $L = 35$ м. Наиболее часто бульдозерное оборудование применяется на дальности от 20 до 50 м (рис. 2). Опыт эксплуатации на основных видах работ показал, что путь набора призмы грунта составляет 6-10 м при дальности транспортирования 26-44 м [6]. При сооружении линейной части трубопроводов выделяют два периода: подготовительный и основной. Бульдозер задействован в операциях, которые относятся подготовительному периоду (подготовка строительной полосы; устройство временных и постоянных дорог) [9].

Основной целью данной работы является разработка конструкции бульдозерного оборудования с целью повышения производительности и снижения энергоемкости процесса копания грунта.

Теоретический анализ. Математическая модель процесса взаимодействия отвала с грунтом

Существующая методика определения сопротивления грунта копанию отвалом с затупленной режущей кромкой характерна для нового ножа отвала. В процессе копания возникают силы сопротивления, которые складываются из трех составляющих: силы резания, сопротивления перемещения бульдозера и сопротивление перемещению призмы волочения. Наибольшую величину сопротивления копанию имеет сила резания [10]. Расчетная схема (рис. 3) составлена для случая, при котором происходит окончание набора призмы волочения. Поскольку последняя уже сформирована перед рабочим органом, сила сопротивления движению грунта вверх по отвалу не учитывается. При использовании отвала сферического типа, имеющего боковые секции, необходимо учесть величину сопротивления косою резания при контакте с грунтом. Расчет базируется на теории предельного равновесия грунта.

Горизонтальная составляющая сопротивления лобовому копанию W_2 определяется по формуле [11]:

$$W_2 = E_2' + E_2'' + (W_6 + G_o) \cdot \mu_1 + W_{np} \quad , \quad (1)$$

где E_2', E_2'' – горизонтальная составляющая сопротивления сколу грунта гранями АВ и ВС соответственно, Н; G_o – сила тяжести отвала, Н; μ_1 – коэффициент трения ножа по грунту,

$\mu_1 = 0,8$; W_{np} – сопротивление перемещению призмы волочения, Н; W_g – вертикальная составляющая сопротивления копанью, Н.

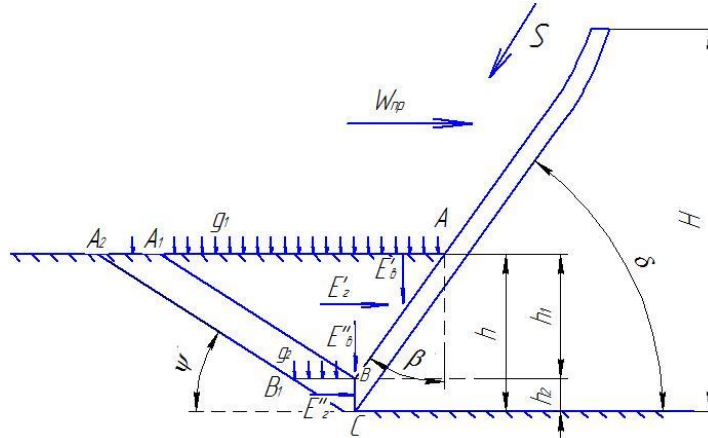


Рис. 3. Расчетная схема для определения сопротивления копанью грунта отвалом

Fig. 3. Calculation scheme for determining the resistance to digging soil with a blade

Горизонтальные составляющие сопротивления грунта сколу гранями АВ и ВС соответственно определяются согласно зависимостям (2) и (3) [11]:

$$E'_z = M \cdot b \int_0^{h_1} \sigma_1 \cdot dz = M_1 \cdot b \cdot \left[K_2 \cdot \left(\frac{\gamma_z \cdot h_1^2}{2} + g_1 \cdot h_1 + C \cdot h_1 \cdot \text{ctg} \varphi_2 \right) - C \cdot h_1 \cdot \text{ctg} \varphi_2 \right],$$

$$E''_z = M \cdot b \int_0^{h_2} \sigma_1 \cdot dz = M_1 b \cdot \left[K_2 \cdot \left(\frac{\gamma_z \cdot h_2^2}{2} + g_2 \cdot h_2 + C \cdot h_2 \cdot \text{ctg} \varphi_2 \right) - C \cdot h_2 \cdot \text{ctg} \varphi_2 \right],$$

где b – ширина резания (с учетом боковых уширителей), м; γ_z – плотность грунта, кг/м³; φ_1 – угол трения грунта по металлу, град; φ_2 – угол внутреннего трения грунта, град; C – коэффициент сцепления грунта, МПа; h_1 – толщина срезаемой стружки, гранью АВ, м; h_2 – толщина срезаемой стружки гранью ВС, м; g_1 – вертикальная равномерно распределенная пригрузка на участке AA_2 , Н/м; g_2 – вертикальная равномерно распределенная пригрузка на плоскости BB_1 , Н/м.

$$M_1 = 1 + \text{tg} \varphi_1 \cdot \text{tg} \beta, \tag{4}$$

где $\beta = (90^\circ - \delta)$.

Коэффициент K_2 определяется по следующей зависимости:

$$K_2 = \frac{\cos \varphi_1 \cdot (\cos \varphi_1 \cdot \sqrt{\sin^2 \varphi_2 - \sin^2 \varphi_1})}{1 - \sin \varphi_2} \cdot \exp \left[(-2\beta + \varphi_1 + \arcsin \frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2}) \cdot \text{tg} \varphi_2 \right]. \tag{5}$$

Равномерно распределенные пригрузки:

$$g_1 = \frac{S}{AA_1} = \frac{\gamma_z \cdot (H - h_1) \cdot \text{tg} \delta \cdot \text{tg} \psi \cdot \left[\cos^2 \varphi_2 \cdot \text{tg} \varphi_2 (H - h_1) + \frac{h_1 \cdot \sin(\delta \cdot \psi)}{\sin \psi} \right] \cdot \sin \delta}{(\text{tg} \delta \cdot \text{tg} \psi) \cdot h_1}. \tag{6}$$

$$g_2 = g_1 + \frac{M_2 \cdot K_2 \cdot \gamma_2 \cdot (h^2 - h_1^2)}{2 \cdot h_2 \cdot (\text{ctg} \delta + \text{ctg} \psi)} \tag{7}$$

где $M_2 = \text{tg} \beta - \text{tg} \varphi_1$; $\psi = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_2}{2}$.

Вертикальная составляющая сопротивления копанью:

$$W_6 = E_6' + E_6'' \tag{8}$$

где E_6', E_6'' – вертикальные составляющие сопротивления сколу гранями AB и BC , H .

$$E_6' = M_2 \cdot b \cdot \left[K_2 \cdot \left(\frac{\gamma_2 \cdot h_1^2}{2} + g_1 \cdot h_1 + C \cdot h_1 \cdot \text{ctg} \varphi_2 \right) - C \cdot h_1 \cdot \text{ctg} \varphi_2 \right], \tag{9}$$

$$E_6'' = M_2 \cdot b \cdot \left[K_2 \cdot \left(\frac{\gamma_2 \cdot h_2^2}{2} + g_2 \cdot h_2 + C \cdot h_2 \cdot \text{ctg} \varphi_2 \right) - C \cdot h_2 \cdot \text{ctg} \varphi_2 \right], \tag{10}$$

где $M_2 = -\text{tg} \varphi_1$.

Согласно ГОСТ 29295-92 [12], объем призмы волочения для сферических отвалов определяется по формуле, отличающейся от неповоротного отвала. Эффективный контур сферического отвала изображен на рис. 3.

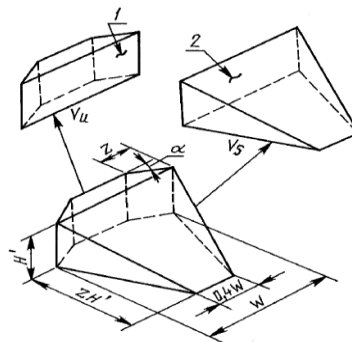


Рис. 3. Призма волочения для сферического и полусферического отвала:
 1 – контур полусферического и сферического отвалов; 2 – прямой и поворотный отвалы

Fig. 3. Drag prism for spherical and hemispherical blades:
 1 – outline of hemispherical and spherical blades; 2 – straight and rotary blades

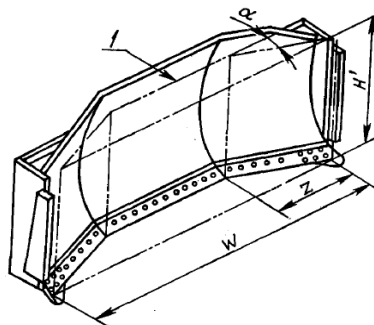


Рис. 5. Расчетная схема определения объема призмы волочения полусферического отвала

Fig. 5. Calculation scheme for determining the volume of a hemispherical dump drag prism

Поскольку предложенная конструкция отвала с поворотными уширителями соответствует процессу копания грунта полусферическим отвалом, постольку на основании расчетной схемы (рис. 5) сопротивление перемещению призмы волочения имеет следующий вид [7, 11]:

$$W_{np} = b \cdot \gamma_2 \cdot \cos^2 \varphi_2 \cdot \frac{(H-h)^2}{2} \cdot Z \cdot H_1 \cdot (b-Z) \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (11)$$

где H_1 – высота боковых секций, м; Z – ширина уширителя измеряемая параллельно длине отвала, м; α – угол поворота уширителя, м.

При расчете горизонтальной составляющей сопротивления копанию учитывается знак при W_e , а также передается вес отвала на грунт или ходовую часть машины.

Для определения суммарной силы сопротивления копанию рабочего органа в режиме закрытых уширителей математическая модель остается прежней за исключением силы W_{np} которая рассчитывается по формуле 11 без учета правой стороны после знака «+» [13]:

$$W_{np} = b \cdot \gamma_2 \cdot \cos^2 \varphi_2 \cdot \frac{(H-h)^2}{2}. \quad (12)$$

К основным параметрам предлагаемой конструкции относятся ширина рабочего органа (b) и уширителей (Z), высота основного отвала (H) и уширителя (H_1) (рис. 6).

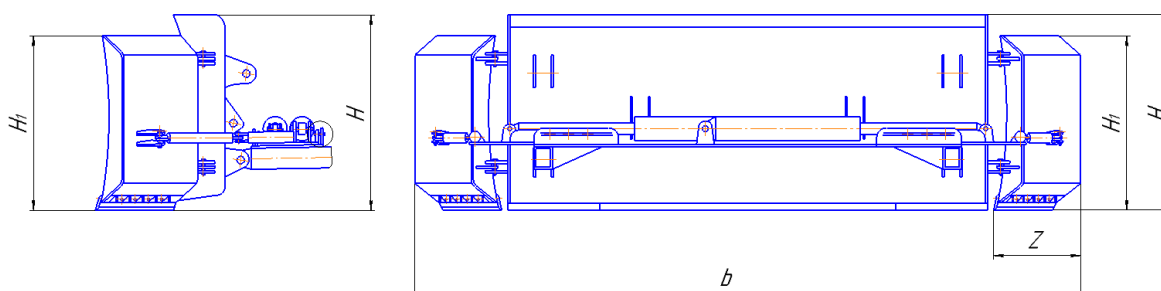


Рис. 6. Параметры предлагаемой конструкции рабочего органа

Fig. 6. Parameters of the proposed design of the working element

Результаты теоретических исследований

Минимальная ширина рабочего органа определяется, исходя из ширины базовой машины, с учетом минимального перекрытия габарита по формуле:

$$B = B_m + 2\delta, \quad (13)$$

где B_m – ширина трактора, м; δ – перекрытие габарита базовой машины, м.

На рис. 7 представлена зависимость силы копания от ширины отвала бульдозера. График зависимости силы копания от высоты рабочего органа приведен для суглинка, с шириной рабочего органа равной 4,5 м (открытые боковые уширители) и срезании стружки толщиной 7 см.

Силы сопротивления копанию, возникающие при работе бульдозера, в значительной степени зависят от толщины срезаемой стружки. График зависимости силы копания от толщины срезаемой стружки приведен при копании суглинка, с шириной рабочего органа равной 4,5 м и высоте 1,35 м представлен на рис. 9. На рис. 10 представлена зависимость силы копания от категории грунта. Рассматривается работа бульдозера в режиме открытых боковых уширителей.

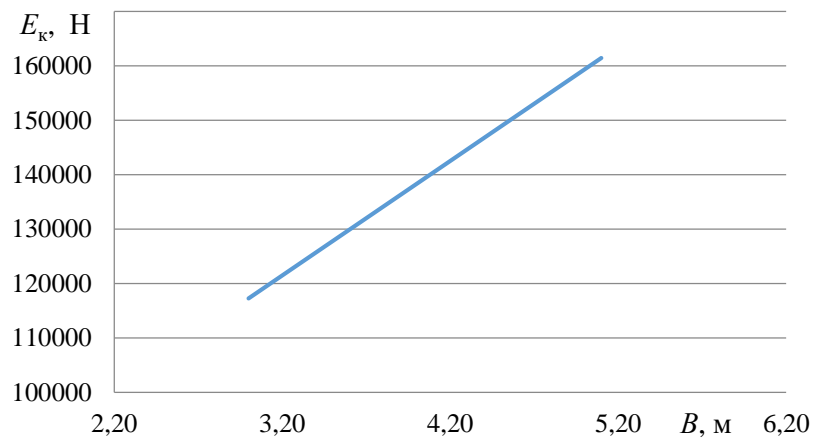


Рис. 7. График зависимости силы копания от ширины рабочего органа

Fig. 7. Graph of digging force versus working tool width

При этом расчет производится при открытых боковых уширителях (рис. 8).

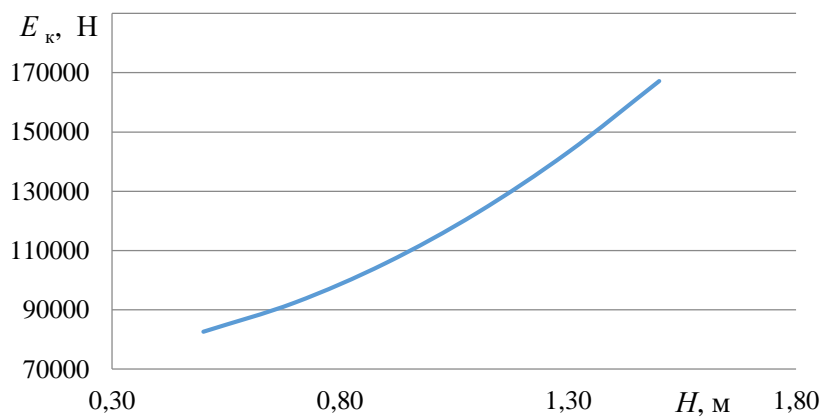


Рис. 8. График зависимости силы копания от высоты рабочего органа

Fig. 8. Graph of digging force versus working tool height

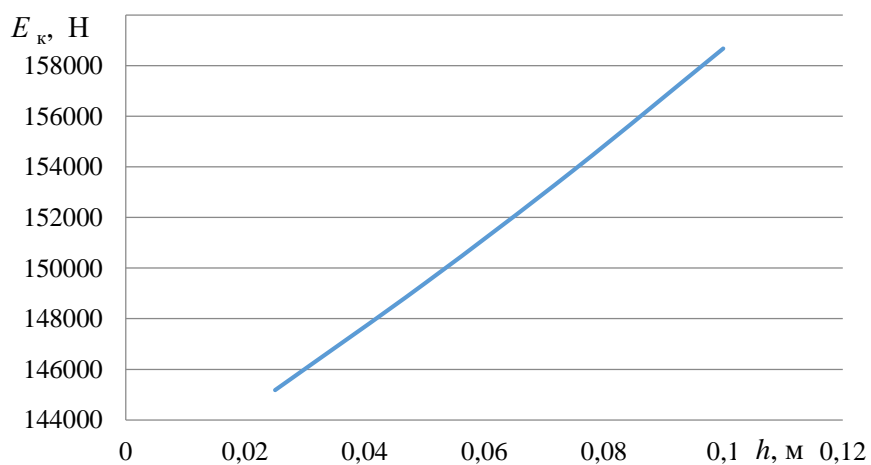


Рис. 9. График зависимости силы копания от толщины срезаемой стружки

Fig. 9. Graph of digging force versus chip thickness

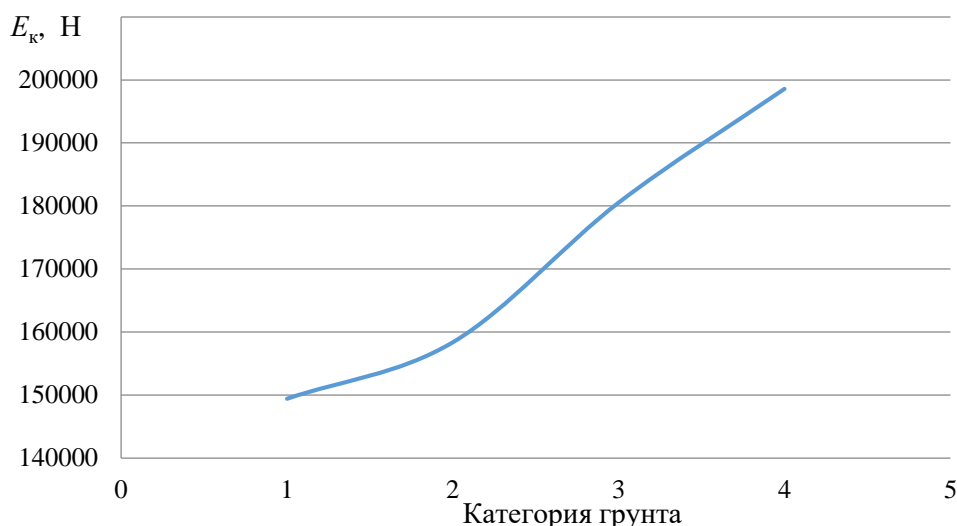


Рис. 10. График зависимости силы копания от категории грунта

Fig. 10. Graph of digging force versus soil category

Проведен сравнительный анализ работы бульдозерного оборудования основным отвалом и с дополнительной отвальной поверхностью. Производительность при использовании основного отвала и дополнительной отвальной поверхности определяется [2, 13]:

$$P = \frac{3600 \cdot (V_c + V_{ш}) \cdot K_y \cdot K_c}{T_{ц}}, \quad (14)$$

где V_c – объем грунт, срезаемый боковыми секциями, м^3 ; $V_{ш}$ – объем грунта, расположенный на основном отвале, м^3 ; $T_{ц}$ – длительность рабочего цикла бульдозера, с; K_y – коэффициент, учитывающий влияние величины уклона на производительность; K_c – коэффициент, учитывающий потери грунта при транспортировании.

На основании приведенных формул на рис. 11 представлен график зависимости производительности бульдозерного оборудования от дальности транспортирования грунта при работе традиционного и инновационного отвалов.

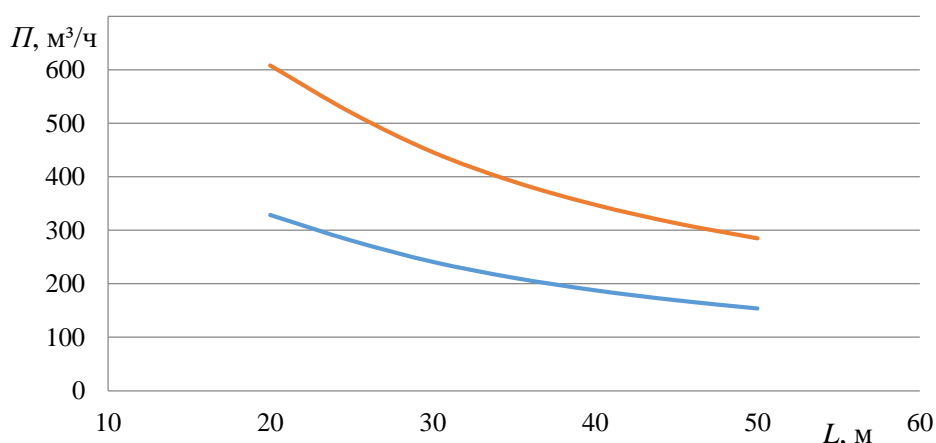


Рис. 11. График зависимости производительности бульдозера от дальности транспортирования грунта:

1 – работа обычным неповоротным отвалом; 2 – работа отвалом, оснащенным уширителями

Fig. 11. Graph of bulldozer performance versus soil hauling distance:

1 – working with a standard fixed blade; 2 – work with a blade equipped with additional sections

Согласно рис. 12, энергоемкость процесса копания грунта с использованием дополнительных отвальных поверхностей (уширителей) снижается на 45 % по сравнению с работой выполняемой основным отвалом.

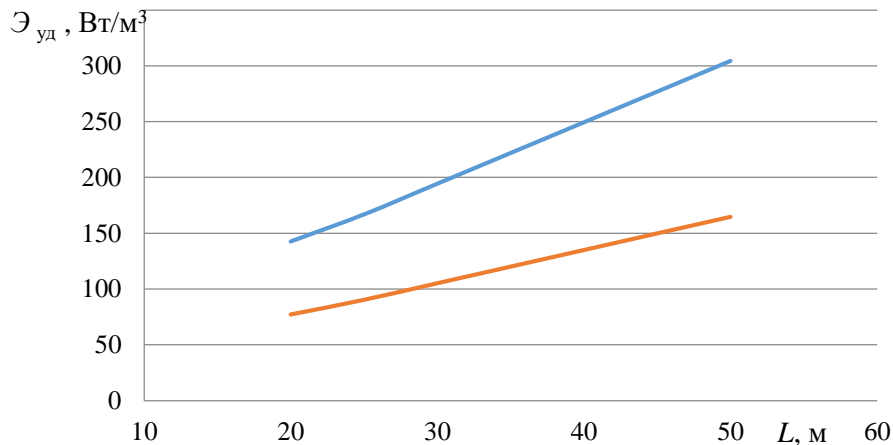


Рис. 12. График зависимости удельной энергоемкости от дальности транспортирования грунта:
1 – работа обычным неповоротным отвалом; 2 – работа отвалом оснащенным уширителями

Fig. 12. Graph of specific energy capacity versus soil hauling distance:

1 – working with a standard fixed blade; 2 – work with a blade equipped with additional sections

Поскольку предлагаемая конструкция может работать в двух режимах: с открытыми и закрытыми боковыми уширителями, рационально определить объем перемещаемого грунта для каждого режима в зависимости от ширины рабочего органа (рис. 13).

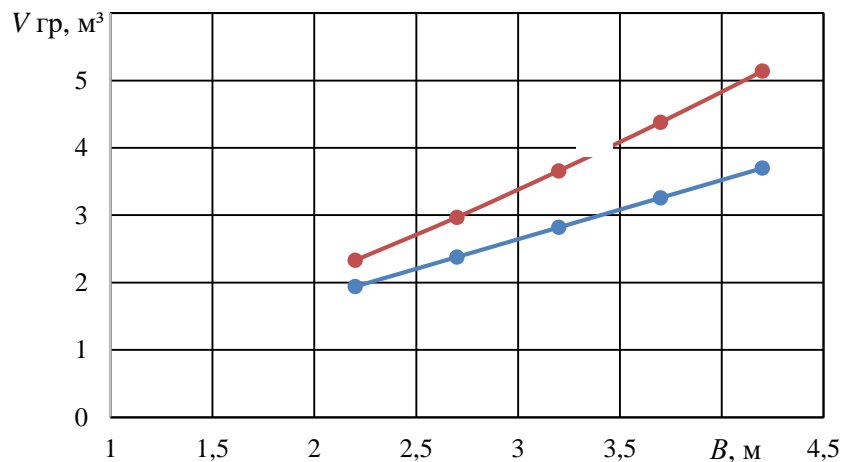


Рис. 13. График зависимости объема перемещаемого грунта от ширины рабочего органа:
1 – работа в режиме открытых уширителей; 2 – работа в режиме закрытых уширителей

Fig. 13. Graph of the volume of soil moved versus the width of the working element:

1 – operation with open additional sections; 2 – operation with closed additional sections

Заключение

Результаты исследований предлагаемой конструкции бульдозерного оборудования показывают, что использование дополнительных управляемых элементов на отвале повышает производительность до 45 %. Конструкция также позволяет добиться увеличения объемов перемещаемого грунта без его потери. Рост показателя достигает 30 %.

Библиографический список

1. **Демиденко, А.И.** Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины / А.И. Демиденко, А.Б. Летопольский, Д.С. Семкин. – Омск: СибАДИ, 2016. – 393 с.
2. **Баловнев, В.И.** Бульдозеры / В.И. Баловнев, Р.Г. Данилов // Строительные и дорожные машины. – 2021. – № 6. – С. 9-18.
3. **Летопольский, А.Б.** Рабочее оборудование экскаватора для выборочного ремонта трубопровода / А.Б. Летопольский, П.А. Корчагин, И.А. Тетерина // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 11 (108). – С. 10-16. – DOI: 10.30987/1999-8775-2021-11-66-72.
4. **Летопольский, А.Б.** Расчет параметров при бестраншейной прокладке газопровода методом ГНБ / А.Б. Летопольский, А.И. Демиденко, И.А. Тетерина // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство. Сборник материалов V Национальной научно-практической конференции. – Омск, 2022. С. 13-16.
5. **Лесковец, И.В.** Оптимизация параметров профиля отвала бульдозера по критерию минимизации сил сопротивления копания / И.В. Лесковец, А.В. Лапицкий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 9. – С. 683-689. – DOI: 10.24412/2071-6168-2024-9-683-684
6. **Шагиахметова, Э.И.** Техничко-экономические показатели бульдозера с поворотным отвалом / Э.И. Шагиахметова, И.Х. Галиев, М.И. Шагиахметова // Строительные конструкции, здания и сооружения. – 2024. – № 4 (9). – С. 54-61.
7. **Артемьев, К.А.** Дорожные машины. Часть 2. Машины для устройства дорожных покрытий / К.А. Артемьев, Т.В. Алексеева, В.Г. Белокрылов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1982. – 396 с.
8. **Цупиков, С. Г.** Машины для строительства, ремонта и содержания автомобильных дорог / С.Г. Цупиков, Н.С. Казачек. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2018. – 184 с.
9. **Баловнев, В.И.** Дорожно-строительные машины и комплексы / В.И. Баловнев, А.Б. Ермилов, А.Н. Новиков [и др.]. – М.: Машиностроение, 1988. – 384 с.
10. **Аукенова, Б.К.** Исследование рабочего процесса бульдозерного отвала с изменяемой геометрией / Б.К. Аукенова, Р.Л. Раденков, А.Г. Савельев [и др.]. // Труды университета. – 2023. – № 2 (91). – С. 67-73. DOI: 10.52209/1609-1825_2023_2_67
11. **Баловнев, В.И.** Интенсификация разработки грунтов в дорожном строительстве: научное издание / В.И. Баловнев, Л.А. Хмара. – М.: Транспорт, 1993. – 383 с.
12. ГОСТ 29295-92. Машины землеройные, бульдозерные отвалы к гусеничным и колесным тракторам. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 7 с.
13. **Болдовская, Т.Е.** Обоснование рациональной формы поперечного профиля неповоротного отвала бульдозера. Дисс... канд. тех. наук.05.05.04. – Омск: СибАДИ, 2006. – 159 с.

References

1. Demidenko A.I., Letopol'skiy A.B., Semkin D.S. Dorozhnye, stroitel'nye i pod'emno-transportnye mashiny: uchebnoe posobie [Road, construction and handling machinery: a textbook]. Omsk: SibADI; 2016. 393 p. (in Russian).
2. Balovnev V.I., Danilov R.G. Bul'dozery [Bulldozers]. Stroitel'nye i dorozhnye mashiny [Construction and Road Building Machinery]. 2021;(6):9-18. (in Russian).
3. Letopol'skiy A.B., Korchagin P.A., Teterina I.A. Rabochee oborudovanie ekskavatora dlya vyborochnogo remonta truboprovoda [Excavator attachment for selective pipeline repair]. Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Bryansk State Technical University]. 2021;(11(108)):10-16. doi: 10.30987/1999-8775-2021-11-66-72. (in Russian).
4. Letopol'skiy A.B., Demidenko A.I., Teterina I.A. Raschet parametrov pri bestransheyroy prokladke gazoprovoda metodom GNB [Calculation of parameters for trenchless gas pipeline laying using HDD method]. In: Obrazovanie. Transport. Innovatsii. Stroitel'stvo. Sbornik materialov V Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Education. Transport. Innovations. Construction. Proceedings of the V National scientific-practical conference]. Omsk; 2022. p. 13-16. (in Russian).
5. Leskovets I.V., Lapitskiy A.V. Optimizatsiya parametrov profilya otvala bul'dozera po kriteriyu minimizatsii sil soprotivleniya kopaniyu [Optimization of bulldozer blade profile parameters based on the criterion of minimizing digging resistance forces]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta.

- Tekhnicheskie nauki [News of Tula State University. Technical sciences]. 2024;(9):683-689. doi: 10.24412/2071-6168-2024-9-683-684. (in Russian).
6. Shagiakhmetova E.I., Galiev I.Kh., Shagiakhmetova M.I. Tekhniko-ekonomicheskie pokazateli bul'dozera s povorotnym otvalom [Technical and economic indicators of a bulldozer with a tilt blade]. Stroitel'nye konstruksii, zdaniya i sooruzheniya [Building structures, buildings and facilities]. 2024;(4(9)):54-61. (in Russian).
 7. Artem'ev K.A., Alekseeva T.V., Belokrylov V.G., et al. Dorozhnye mashiny. Chast' 2. Mashiny dlya ustroystva dorozhnykh pokrytiy [Road machines. Part 2. Machines for road pavement construction]. Moscow: Mashinostroenie; 1982. 396 p. (in Russian).
 8. Tsupikov S.G., Kazachek N.S. Mashiny dlya stroitel'stva, remonta i sodержaniya avtomobil'nykh dorog [Machines for construction, repair and maintenance of highways]. Vologda: Infra-Inzheneriya; 2018. 184 p. (in Russian).
 9. Balovnev V.I., Ermilov A.B., Novikov A.N., et al. Dorozhno-stroitel'nye mashiny i komplekсы: uchebnyk dlya vuzov po spets. «Stroitel'nye, dorozhnye mashiny i oborudovanie» [Road construction machinery and complexes: a textbook for universities in the specialty «Construction and road machinery and equipment»]. Balovnev V.I., editor. Moscow: Mashinostroenie; 1988. 384 p. (in Russian).
 10. Aukenova B.K., Radenkov R.L., Savel'ev A.G., et al. Issledovanie rabochego protsessа bul'dozernogo otvalа s izmenyaemoy geometriey [Study of the working process of a bulldozer blade with variable geometry]. Trudy universiteta [Proceedings of the University]. 2023;(2(91)):67-73. doi: 10.52209/1609-1825_2023_2_67. (in Russian).
 11. Balovnev V.I., Khmara L.A. Intensifikatsiya razrabotki gruntov v dorozhnom stroitel'stve: nauchnoe izdanie [Intensification of soil excavation in road construction: a scientific publication]. Moscow: Transport; 1993. 383 p. (in Russian).
 12. GOST 29295-92. Mashiny zemleroynye, bul'dozernye otvaly k gusenichnym i kolesnym traktorам [Earth-moving machinery, bulldozer blades for crawler and wheel tractors]. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1992. 7 p. (in Russian).
 13. Boldovskaya T.E. Obosnovanie ratsional'noy formy poperechnogo profilyа neporotnogo otvalа bul'dozera [Substantiation of the rational cross-sectional shape of a fixed bulldozer blade] [dissertation]. Omsk: SibADI; 2006. 159 p. (in Russian).

**Дата поступления
в редакцию: 29.09.2025**

**Дата принятия
к публикации: 18.04.2026**