

Научная статья
УДК 621.878.23-182.38

Исследование применения новых геометрических форм бульдозерных отвалов наряду с типовыми

Сергей Аркадьевич Павлов¹, Евгений Дмитриевич Тимофеев²

^{1,2}Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹blp1stw@ya.ru

²EvgenyTimofeev2857@yandex.ru

Аннотация. Применение различных типов конструкций бульдозерных отвалов позволяет разнообразить модельный ряд бульдозерного оборудования и обеспечить наиболее производительный режим работы. Накоплению объема призмы волочения могут способствовать и дополнительные конструкционные особенности, например, расширение отвалов за счет дополнительных боковых стенок, увеличение длины ножа отвала или площади верхних щитков. В статье выполнено исследование зависимости объема призмы волочения, которая накапливается отвалом, и непосредственно влияет на производительность бульдозерного агрегата. Авторами исследованы четыре типа конструкций бульдозерных отвалов, с целью повышения производительности существующих машин. Описана методика экспериментальных исследований, выполненных на модельных образцах бульдозерных отвалов, спроектированных на основе реальных, в соответствии с теорией подобия, применяемой при моделировании. Установлено соотношение масс призм, набираемых разными конструкциями экспериментальных отвалов, а также определен коэффициент чистоты, отражающий накопление материала на поверхностях отвала, свидетельствующий о дополнительных затратах мощности источника энергии машины. Исследованием установлено, что применение новых форм бульдозерных отвалов вполне допустимо на действующей технике.

Ключевые слова: бульдозерная техника, призма волочения, объем призмы волочения, бульдозерное оборудование, коэффициент чистоты, производительность бульдозера, моделирование, теория подобия.

Для цитирования: Павлов С.А., Тимофеев Е.Д. Исследование применения новых геометрических форм бульдозерных отвалов наряду с типовыми // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2025. № 4 (46).

Original article

Research on the application of new geometric shapes of bulldozer blades with typical

Sergey A. Pavlov¹, Evgeny D. Timofeev²

^{1,2}Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

¹blp1stw@ya.ru

²EvgenyTimofeev2857@yandex.ru

Abstract. The use of different types of bulldozer dump designs allows you to diversify the range of bulldozer equipment and ensure the most productive mode of operation. Additional structural features can also contribute to the accumulation of the volume of the drawing prism, for example, the expansion of the dumps due to additional side walls, an increase in the length of the blade blade or the area of the upper flaps. The article examines the dependence of the volume of the drawing prism, which accumulates in the blade, and directly affects the performance of the bulldozer unit. The authors investigated four types of bulldozer dump designs in order to increase the productivity of existing machines. The method of experimental studies performed on model samples of bulldozer dumps, designed on the basis of real ones, in accordance with the theory of similarity used in modeling, is described. The ratio of the masses of the prisms collected by different designs of experimental dumps has been established, and the purity coefficient has also been determined, reflecting the accumulation of material on the surfaces of the blade, indicating the additional cost of the power source of the machine. The study found that the use of new forms of bulldozer dumps is quite acceptable on existing equipment.

Keywords: bulldozer machinery, drawing prism, drawing prism volume, bulldozer equipment, purity coefficient, bulldozer productivity, modeling, similarity theory.

For citation: Pavlov S.A., Timofeev E.D. Research on the application of new geometric shapes of bulldozer blades with typical. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura.* 2025. № 4 (46).

Введение

Тягачи с бульдозерным оборудованием широко используют на строительных площадках. Это обусловлено тем, что в последнее время темпы строительства очень высоки. Бульдозеры занимают центральное место среди техники, используемой для обработки, перемещения и планировки грунта. Одной из главных характеристик строительной машины, определяющей её производительность, является форма отвала [1].

Существует несколько типов отвалов. Геометрические параметры рабочего оборудования бульдозера сильно влияют на объем призмы волочения, накапливаемый отвалом [2, 10]. Помимо прямого, полусферического и сферического отвалов существуют конструкции, в которых некоторые элементы отвалов, относящихся к разным группам, объединены для увеличения производительности. В связи с постоянно растущими требованиями к бульдозерному оборудованию авторами проводится исследование зависимости объема призмы волочения, непосредственно влияющего на производительность бульдозерного оборудования, от предложенных четырех типов конструкций отвалов. Результаты исследования позволяют утверждать, что правильный выбор формы отвала обеспечит более эффективное использование времени в цикле работы бульдозера, что снизит затраты на выполнение работ и сократит итоговую стоимость объекта при сохранении его качества [4-8].

Методика исследований

Для проведения экспериментальных исследований по выявлению типа отвала для земляных работ была разработана экспериментальная установка (рис. 1), включающая в себя:

- набор пластиковых элементов, моделирующих отвал с учетом критериев подобия, соединенных с помощью «ласточкиного хвоста»;
- установка, имитирующая поверхность земляного полотна;
- крепёжный элемент;
- линейка;
- фотокамера;
- лопата совковая;
- пластиковое ведро;
- динамометрические весы;
- инженерный калькулятор.



Рис. 1. Экспериментальная установка в сборе, 1-й эксперимент

Чтобы определить эффективность работы различных типов отвалов было проведено четыре эксперимента с разными конструкциями отвалов: прямой без ножа (рис. 1), прямой с ножом (рис. 2), прямой с ножом и защитным козырьком (рис. 3), прямой с ножом и защитным козырьком увеличенного радиуса (рис. 4).

Для облегчения контроля эксперимента и регистрации данных каждой конструкции был присвоен номер, приведенный в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики конструкций экспериментальных отвалов

Номер конструкции отвала	Характеристика конструкции отвала
1	прямой без ножа
2	прямой с ножом
3	прямой с ножом и защитным козырьком
4	прямой с ножом и защитным козырьком увеличенного радиуса

Перед каждым экспериментом была подготовлена полоса грунта толщиной 30 мм и длиной 2000 мм с одинаковой плотностью.

Поочередно в ходе экспериментов устанавливали разные конструкции отвалов. До эксперимента, во время и после проводилась фото и видео фиксация. После каждого эксперимента новое грунтовое полотно восстанавливали с заданными параметрами.



Рис. 2. Отвал 2, 2-й эксперимент



Рис. 3. Отвал 3, 3-й эксперимент



Рис. 4. Отвал 4, 4-й эксперимент

После каждого эксперимента было осуществлено взвешивание призмы волочения, накопленной перед отвалом, а также отвала с налипшим грунтом с помощью динамометрических весов. Результаты накопления призмы продемонстрированы на рисунках 5 – 8.



Рис. 5. Результат 1-го эксперимента



Рис. 6. Результат 2-го эксперимента



Рис. 7. Результат 3-го эксперимента



Рис. 8. Результат 4-го эксперимента

Для определения объёма призмы волочения использовалась формула:

$$V_{\text{пр}} = \frac{m_{\text{пр}i}}{\rho}, \quad (1)$$

где $m_{\text{пр}i}$ – масса призм разных конструкций отвалов.

Для оценки влияния различных форм отвала на эффективность работы бульдозера был выполнен расчет производительности ($\text{м}^3/\text{с}$):

$$П = \frac{V_{np}}{T_{ц}} \quad (2)$$

где $T_{ц}$ – время цикла работы бульдозера, с.

На производительность бульдозера прямо пропорционально влияет объем призмы волочения V_{np} :

$$V_{np} = \frac{h_{отв}^2 b_{отв} k_{отв}}{2 k_{np} k_{рых}}, \quad (3)$$

где $h_{отв}$ – полная высота отвала, м; $b_{отв}$ – длина отвала, м; $k_{отв}$ – коэффициент, учитывающий тип отвала; k_{np} – коэффициент, учитывающий особенности формы призмы волочения; $k_{рых}$ – коэффициент разрыхления грунта при разработке. Формула (3) приведена как физическая модель, отражающая связь геометрических параметров отвала, коэффициентов формы отвала и разрыхления грунта для вычисления объёма призмы волочения.

Расчет был выполнен с учетом критериев подобия, по которым моделировали отвал при проведении эксперимента. Плотность грунта в экспериментальной установке $\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$.

Соотношение масс призм, набираемых разными конструкциями экспериментальных отвалов $K_{с.м.}$, определено в долях от массы призмы на отвале номер 1. Затем массы призм остальных отвалов сравнивались с первой, используя соотношение:

$$K_{с.м.} = \frac{m_{np i}}{m_{np 1}}, \quad (4)$$

где $m_{np i}$ – массы призм экспериментальных отвалов конструкций 1, 2, 3, 4.

По такому же алгоритму определялся коэффициент чистоты отвала $K_{чис}$. Сравнивались массы отвалов одинаковой конструкции до эксперимента и после, используя соотношение:

$$K_{чис} = \frac{m_i}{m'_i}, \quad (5)$$

где m_i – масса отвала до эксперимента; m'_i – масса этого же отвала после эксперимента.

Оптимальное значение коэффициента чистоты отвала равно единице. В результате эксперимента получены точные значения коэффициента чистоты отвала, в зависимости от конструкции отвала и применяемого материала.

Для определения дальнейшей применимости изучаемых конструкций экспериментальных отвалов в реальных условиях рассматривались существующие тягачи с бульдозерным оборудованием тяжелого класса (табл. 2).

Масштабирование экспериментальных отвалов проводилось согласно теории подобия Баловнева В. И. по рассчитываемому параметру «вместимость основного ковша q » с использованием коэффициента k_{13} , приведенному в табл. 3. Определяющим параметром является мощность двигателя тягача N [3].

Таблица 2

Тягачи с бульдозерным оборудованием тяжелого класса

Характеристика	Модель бульдозера				
	Cat D5	Komatsu D65EX-16	ЧТЗ Б96010Е	Урал D10	LiuGong B 160C
Мощность ДВС, кВт	127	170	145,5	176	120
Вместимость отвала, м ³	3	5,6	5,8	4	4,8

Таблица 3

Формулы для определения основных технических параметров машин, взаимодействующих со средой

Рассчитываемый параметр	Определяющий параметр				
	N	T	m	q	l
Мощность	–	$k_1 \cdot T$	$k_2 \cdot m$	$k_3 \cdot q$	$k_4 \cdot l^3$
Тяговое усилие	$k_5 \cdot N$	–	$k_6 \cdot m$	$k_7 \cdot q$	$k_8 \cdot l^3$
Масса	$k_9 \cdot N$	$k_{10} \cdot T$	–	$k_{11} \cdot q$	$k_{12} \cdot l^3$
Вместимость основного ковша	$k_{13} \cdot N$	$k_{14} \cdot T$	$k_{15} \cdot m$	–	$k_{16} \cdot l^3$
Линейный размер	$k_{17} \cdot N^{1/3}$	$k_{18} \cdot T^{1/3}$	$k_{19} \cdot m^{1/3}$	$k_{20} \cdot q^{1/3}$	–
Вместимость ковша дополнительного оборудования	$k_{21} \cdot N$	$k_{22} \cdot T$	$k_{23} \cdot m$	$k_{24} \cdot q$	$k_{25} \cdot l^3$
Грузоподъемность	$k_{26} \cdot N$	$k_{27} \cdot T$	$k_{28} \cdot m$	$k_{29} \cdot q$	$k_{30} \cdot l^3$
Рабочая скорость $v = 1,0 \dots 1,5$ м/с	$V = const$				

Для определения мощности, требуемой установке для набора и перемещения призмы, проведено сравнение объёмов призм реальных бульдозеров с мощностями двигателей, которые на данные бульдозеры установлены, путём введения коэффициента отношения объёма призмы к мощности двигателя $K_{V/N}$.

$$K_{V/N(i)} = \frac{V_i}{N_i}, \quad (6)$$

где V_i – объём призмы волочения у реальных бульдозеров; N_i – мощность двигателя у реальных бульдозеров.

Для уменьшения погрешности вычислений определены пять коэффициентов для разных производителей бульдозеров и их среднее арифметическое $K_{V/N \text{ ср. ариф.}}$.

$$K_{V/N \text{ ср. ариф.}} = \frac{\sum_1^5 K_{V/Ni}}{5}. \quad (7)$$

Исходя из полученных данных, определена требуемая мощность для экспериментальных отвалов:

$$N_{\text{тр.}i} = \frac{q_i}{K_{V/N \text{ ср. ариф.}}}, \quad (8)$$

где q_i – вместимость отвала у экспериментальных конструкций.

Для расчетов по вместимости основного ковша был использован коэффициент k_{13} , определяемый по табл. 4, q_0 – вместимость отвала; N_0 – мощность двигателя бульдозера с выбранным отвалом.

Затем, по формуле для расчета вместимости основного ковша из табл. 3, определены объемы призм экспериментальных отвалов, масштабированных до реальных размеров [9].

Для того чтобы определить возможность совместного использования экспериментального отвала с выбранными бульдозерами, необходимо сравнить объём призмы экспериментальных q_i и заводских V_i отвалов:

$$q_i \leq V_i. \quad (9)$$

Таблица 4

Коэффициенты пропорциональности для подобных экскаваторов и дорожных машин

Коэффициент	Расчетная зависимость	Коэффициент	Расчетная зависимость	Коэффициент	Расчетная зависимость
k_1	$\frac{N_0}{T_0}$	k_{11}	$\frac{m_0}{q_0}$	k_{21}	$\frac{q_{до}}{N_0}$
k_2	$\frac{N_0}{m_0}$	k_{12}	$\frac{m_0}{l_0^3}$	k_{22}	$\frac{q_{до}}{T_0}$
k_3	$\frac{N_0}{q_0}$	k_{13}	$\frac{q_0}{N_0}$	k_{23}	$\frac{q_{до}}{m_0}$
k_4	$\frac{N_0}{l_0^3}$	k_{14}	$\frac{q_0}{T_0}$	k_{24}	$\frac{q_{до}}{q_0}$
k_5	$\frac{T_0}{N_0}$	k_{15}	$\frac{q_0}{m_0}$	k_{25}	$\frac{q_{до}}{l_0^3}$
k_6	$\frac{T_0}{m_0}$	k_{16}	$\frac{q_0}{l_0^3}$	k_{26}	$\frac{m_{гр0}}{N_0}$
k_7	$\frac{T_0}{q_0}$	k_{17}	$\frac{l_0}{N_0^{1/3}}$	k_{27}	$\frac{m_{гр0}}{T_0}$
k_8	$\frac{T_0}{l_0^3}$	k_{18}	$\frac{l_0}{T_0^{1/3}}$	k_{28}	$\frac{m_{гр0}}{m_0}$
k_9	$\frac{m_0}{N_0}$	k_{19}	$\frac{l_0}{m_0^{1/3}}$	k_{29}	$\frac{m_{гр0}}{q_0}$
k_{10}	$\frac{m_0}{T_0}$	k_{20}	$\frac{l_0}{q_0^{1/3}}$	k_{30}	$\frac{m_{гр0}}{l_0^3}$

Сравнение показывает, сможет ли двигатель бульдозера развить усилие, способное набрать и переместить призму, накопленную на экспериментальном отвале.

Результаты и их обсуждение

В ходе эксперимента и расчета получены данные, приведенные в табл. 5.

Таблица 5

Результаты экспериментальных данных

Номер конструкции отвала	$q, \text{ м}^3$	$\Pi, \text{ м}^3/\text{ч}$	$K_{с.м.}$	$K_{чис}$	$N_{тр.i}, \text{ кВт}$
1	0,009	1,62	1	0,91	0,023
2	0,011	1,98	1,22	0,84	0,028
3	0,0123	2,214	1,37	0,79	0,031
4	0,0133	2,394	1,48	0,64	0,034

После масштабирования экспериментальных конструкций отвалов до натуральных размеров получены значения вместимости отвалов, которые сравнивались с вместимостями заводских отвалов (табл. 2). Результаты сравнения приведены в табл. 6.

Таблица 6

Сопоставление натуральных и экспериментальных отвалов

Номер конструкции/модель	Cat D5	Komatsu D65EX-16	ЧТЗ Б96010Е	Урал D10	LiuGong B 160С
	Объём призмы, м ³				
1	4,97	6,65	5,69	6,89	4,70
2	4,99	6,68	5,72	6,91	4,71
3	5,05	6,76	5,79	7,00	4,77
4	4,98	6,67	5,71	6,90	4,71
Итог сравнения	Не подходит	Не подходит	Подходит	Не подходит	Подходит

Сравнение показало, что использование всех экспериментальных конструкций отвалов возможно только на бульдозерах ЧТЗ Б96010Е и LiuGong B 160С, так как выполняется условие (9), а значит мощности стандартных ДВС данной техники достаточно для работы с использованием новых конструкций отвалов.

В результате самым вместительным отвалом является экспериментальная конструкция номер 3.

Выводы

В результате проведенного исследования удалось определить геометрически наиболее вместительную конструкцию отвала из рассматриваемых. Оказалось, что при усложнении формы отвала наблюдается уменьшение объема призмы волочения, что доказывают полевые испытания в реальных условиях на многих моделях.

Материалы выполненного исследования допустимо использовать в дальнейших разработках новых типов конструкций бульдозерных отвалов, а также в совершенствовании существующих.

Список источников

1. Определение параметров сборной модели отвала бульдозера / И. Е. Гулий, Д. Р. Панченко, М. С. Осипов [и др.] // Механики XXI века. – 2025. – № 24. – С. 22-27. – EDN FYPNUN.
2. Коншин, В. М. Изучение конструкции и выбор бульдозеров для конкретных условий эксплуатации : метод. указания к лаб. и практ. работам / В. М. Коншин, Е.С. Локшин, С.Е. Сабуренков ; под ред. В.В. Виноградова. – Москва : МАДИ, 2015. – 24 с.
3. Баловнев, В. И. Подобие и моделирование в системе проектирования дорожно-строительных машин : Учебное пособие / В. И. Баловнев. – Москва : Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2014. – 148 с. – EDN TCOGAD.
4. Производственная компания дорожно-строительной техники «CAT» : официальный сайт. – URL: https://www.cat.com/ru_RU.html (дата обращения: 08.10.2025).
5. Производственная компания дорожно-строительной техники «KOMATSU»: официальный сайт. – URL: <https://komatsu-ru.com> (дата обращения: 08.10.2025).
6. Производственная компания дорожно-строительной техники «Челябинский тракторный завод»: официальный сайт. – URL: <http://www.chtz.ru> (дата обращения: 09.10.2025).
7. Производственная компания дорожно-строительной техники «ДСТ-УРАЛ»: официальный сайт. – URL: <https://tml0.ru> (дата обращения: 10.10.2025).
8. Производственная компания дорожно-строительной техники «LiuGong»: официальный сайт. – URL: <https://liugong-russia.ru> (дата обращения: 10.10.2025).
9. Определение геометрических параметров бульдозерного отвала при его проектировании / М. Ю. Чукалов, Р. С. Семизельников, А. В. Паничкин, А. А. Божанов // Электронный научный журнал. – 2021. – № 3(41). – С. 16-21. – EDN ZNDQIM.
10. Вопросы развития техники для строительства, ремонта и восстановления автомобильных дорог / В. И. Баловнев, Г. В. Кустарев, Р. Г. Данилов, Н. Д. Селиверстов // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2021. – № 4(98). – С. 8-10. – EDN JQHOBA.

References

1. Guliy I.Ye., Panchenko D.R., Osipov M. S. Timofeev E.D., Pogonina A.M. *Mekhaniki XXI veku*, 2025, no. 24, pp. 22-27.
2. Konshin V. M., Lokshin Ye. S., Saburenkov S.E. *Izuchenie konstrukcii i vybor bul'dozеров dlya konkretnyh uslovij ekspluatatsii (Study of the design and selection of bulldozers for specific operating conditions)*, Moscow, MADI, 2015, 24 p.
3. Balovnev V. I. *Podobie i modelirovanie v sisteme proektirovaniya dorozhno-stroitel'nyh mashin (Similarity and modeling in the design system of road construction machinery)*, Moscow, MADI, 2014, 148 p.

4. Proizvodstvennaya kompaniya dorozhno-stroitel'noy tekhniki «CAT», available at: https://www.cat.com/ru_RU.html (08.10.2025).
5. Proizvodstvennaya kompaniya dorozhno-stroitel'noy tekhniki «KOMATSU», available at: <https://komatsu-ru.com> (08.10.2025).
6. Proizvodstvennaya kompaniya dorozhno-stroitel'noy tekhniki «Chelyabinskiy traktorny zavod», available at: <http://www.chtz.ru> (09.10.2025).
7. Production company of road construction equipment "DST-URAL", available at: <https://tm10.ru> (10.10.2025).
8. Proizvodstvennaya kompaniya dorozhno-stroitel'noy tekhniki «LiuGong», available at: <https://liugong-russia.ru> (10.10.2025).
9. Chukalov M.Yu, Semizel'nikov R.S., Panichkin A.V., Bozhanov A.A. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2021, no. 3(41), pp. 16-21
10. Balovnev V.I., Kustarev G.V., Danilov R.G., Seliverstov N.D. *Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli*, 2021, no. 4(98), pp. 8-10.

Рецензент: Ю.В. Штефан, канд. техн. наук, доц., МАДИ

Информация об авторах

Павлов Сергей Аркадьевич, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

Тимофеев Евгений Дмитриевич, студент, МАДИ.

Information about the authors

Pavlov Sergey A., Candidate of Sciences (Technical), associate professor, MADI.

Timofeev Evgeny D., student, MADI.

Статья поступила в редакцию 12.11.2025; одобрена после рецензирования 16.12.2025; принята к публикации 24.12.2025.

The article was submitted 12.11.2025; approved after reviewing 16.12.2025; accepted for publication 24.12.2025.