

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОФИЛЯ ОТВАЛА БУЛЬДОЗЕРА ПО КРИТЕРИЮ МИНИМИЗАЦИИ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОПАНИЮ

И.В. Лесковец, А.В. Лапицкий

Целью представленной работы является снижение сил сопротивления копанью отвалом рабочего оборудования бульдозера за счет оптимизации параметров профиля отвала. Для достижения заданной цели используется специализированное программное обеспечение, использующее научные основы моделирования работы системы грунт – рабочее оборудование с помощью определения предельных состояний грунта. Анализ полученных зависимостей позволил установить оптимальные значения факторов варьирования, при которых силы сопротивления копанью снизились на 26 % по сравнению с вариантом, в котором силы сопротивления копанью определены по общепринятой методике.

Ключевые слова: бульдозер, рабочее оборудование, отвал, силы сопротивления копанью, моделирование.

На протяжении ряда лет до настоящего времени бульдозер является одной из машин, которая наиболее широко применяется в строительстве. Одним из постоянных направлений модернизации рабочего оборудования является снижение сил сопротивления копанью. Уменьшение этого показателя автоматически приводит к повышению топливной экономичности и эффективности бульдозера. Проблемам снижения сил сопротивления копанью бульдозерами уделяется серьезное внимание, начиная с середины XX века [1, 2]. Ученые, которые занимались решением данной проблемы, отмечают, что силы сопротивления копанью зависят от комплекса параметров отвала и грунта. На текущий момент предложено много зависимостей, позволяющих определить силы сопротивления копанью в зависимости от параметров грунта и отвала [3, 4]. Однако, практически все исследователи отмечают, что предложенные зависимости являются частными случаями для сложившихся уникальных условий, зависящих от типов грунтов и параметров отвалов. Многие предлагаемые методики определения сил сопротивления копанью отличаются высокой сложностью и, тем не менее, не дают достоверных результатов в разных условиях, позволяющих с высокой точностью определять на стадии проектирования силы, возникающие при разработке грунтов.

В настоящее время проблемам снижения сопротивления копанью отвалом бульдозера уделяется значительное внимание. Ученые проводят теоретические и экспериментальные исследования, посвященные установлению таких параметров отвала, при которых возможно снижение сил сопротивления копанью. Некоторые авторы предлагают для увеличения эффективности работы бульдозера составную управляемую конструкцию отвала [5], что позволяет увеличить производительность бульдозерного агрегата, однако влияние на величины сил сопротивления копанью такой конструкции авторами не исследованы. Модернизации отвального рабочего оборудования посвящены исследования [6], в которых авторы предлагают внесение дополнительных элементов в конструкцию отвала и исследуют влияние этих элементов на энергоэффективность процесса разработки грунта. Результатом данных исследований является установка факта наличия реактивных усилий от формирующихся в процессе копания боковых валиков грунта. Значительное внимание уделяется авторами исследованию эффективности конструкций бульдозерных отвалов [7]. Авторы данных исследований решают задачу повышения эффективности бульдозерного агрегата, однако методы решения отличаются от методов, предлагаемых в данной публикации. Авторами исследования [7] проанализированы различные конструкции отвалов, установлена наиболее эффективная, однако не указано, для каких категорий и видов грунтов можно использовать представленные рекомендации. Повышение производительности отвала за счет снижения прилипания грунта к отвалу рекомендовано авторами [5]. В данном исследовании предложены конструкции отвалов для разных типов грунтов, в которых используются дополнительные устройства для очистки отвалов. Авторами исследований [8] предлагается использование ковшовой конструкции отвала с целью увеличения производительности бульдозерного агрегата. Увеличения производительности бульдозера авторы работы [9] добиваются за счет снижения налипания грунта на отвал. Одним из основных недостатков рассмотренных работ является недостаточное обоснование получаемых результатов методами, позволяющими получить численные значения сил сопротивления копанью в зависимости от конкретных исходных данных.

Авторами статьи на основании теории разработки грунтов отвальными рабочими органами Е.И. Берестова [10-13] разработаны методика и программное обеспечение, позволяющие определять величины сил сопротивления копанью, возникающие при разработке грунтов на всех стадиях в зависимости от параметров отвала и грунта. Данная методика позволяет на основании численного моделирования процесса копания грунта и теории планирования эксперимента определить наиболее оптимальные параметры профиля отвала для выбранного типа грунта.

Для нахождения оптимальных параметров профиля отвала используется теория планирования эксперимента, с помощью которой построена матрица планирования эксперимента. Для нахождения значений функций отклика проведена серия вычислительных экспериментов при различных факторах варьирования, на основе полученных результатов построено уравнение регрессии, с помощью которого определены оптимальные значения факторов варьирования.

Рассмотрим возможности оптимизации параметров профиля отвала для колесного бульдозера 8 тягового класса. В качестве исходных данных примем значения, представленные в табл. 1.

В соответствии с условиями оптимизации, параметры профиля отвала должны быть выбраны для его заданной высоты и ширины.

В начале определим силы сопротивления копания без учета оптимизируемых параметров основания общепринятых методик [4, 14].

Силу сопротивления резанию определяем из выражения

$$W_c = k_c B h, \quad (1)$$

где k_c – удельное сопротивление резанию, принято для второй категории грунта $k_c = 80 \text{ кПа}$; B – ширина отвала, для расчета $B = 2,8$ м; h – толщина стружки, для расчета принято $h = 0,3$ м.

Таблица 1

Исходные данные для определения сил сопротивления копанию

Наименование показателя	Ед. изм.	Значение
Масса машины	т	12,5
Ширина отвала без уширителей	м	2,8
Высота отвала	м	1
Максимальная толщина стружки	м	0,3
Плотность грунта	кг/м ³	1600
Удельное сопротивление грунта резанию	кПа	80
Коэффициент трения грунта по металлу		0,4
Коэффициент трения грунта по грунту		0,6

Сила сопротивления резанию равна

$$W_c = 80 \cdot 2,8 \cdot 0,3 = 67,2 \text{ кН.}$$

Вычисляем высоту отвала с учетом толщины стружки

$$H = 1,05 - h. \quad (2)$$

Высота отвала с учетом толщины стружки равна

$$H = 1,05 - 0,3 = 0,75 \text{ м.}$$

В зависимости от отношения высоты отвала H к ширине $H/B = 0,336$ по [13] определяем коэффициент призмы волочения $k_{dp} = 1,15$.

Вычислим сопротивление перемещению призмы волочения грунта перед отвалом

$$W_p = \rho \cdot g \frac{B \cdot H^2}{2000 \cdot k_{dp}} (f_2 + i), \quad (3)$$

где ρ – плотность грунта, для расчетов принято $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$; g – гравитационное ускорение, $g = 9,81$.

Сопротивление перемещению призмы волочения грунта перед отвалом

$$W_p = 1600 \cdot 9,81 \frac{2,8 \cdot 0,75^2}{2000 \cdot 1,15} (0,6 + 0,24) = 9,1 \text{ кН.}$$

Сопротивление перемещению грунта вверх по отвалу

$$W_{fr} = \rho \cdot g \frac{B \cdot H^2}{2000 \cdot k_{dp}} \cdot f_1 (\cos(\alpha))^2, \quad (4)$$

где α – угол резания, $\alpha = 50^\circ$; f_1 – коэффициент трения грунта по металлу, принято $f_1 = 0,4$.

Сопротивление перемещению грунта вверх по отвалу равно

$$W_{fr} = 1600 \cdot 9,81 \frac{2,8 \cdot 0,75^2}{2000 \cdot 1,15} \cdot 0,4 \cdot \cos^2(50) = 4,0 \text{ кН.}$$

Суммарная сила сопротивления копанию

$$W_s = W_c + W_p + W_{fr}, \quad (5)$$

равна

$$W_s = 67,2 + 9,1 + 4 = 80,3 \text{ кН.}$$

Учитывая, что сила сопротивления перемещению бульдозера, определяемая выражением:

$$W_b = G \cdot (\omega + i), \quad (6)$$

где G – сила тяжести машины, $G = 134,89 \text{ кН}$; ω – коэффициент сопротивления перемещению, $\omega = 0,02$; i – индекс уклона, $i = 0,24$, получим

$$W_b = 134,89(0,02 + 0,24) = 35,07 \text{ кН,}$$

а суммарное сопротивление перемещению бульдозера во время копания

$$W_{sb} = W_b + W_s \quad (7)$$

равно

$$W_{sb} = 38,07 + 80,3 = 118,37 \text{ кН.}$$

Так как максимальная сила тяги по сцеплению данной машины определяется выражением

$$T_{cl} = G \cdot \varphi, \quad (8)$$

где φ – коэффициент сцепления, $\varphi = 0,6$.

Сила тяги бульдозера по сцеплению

$$T_{cl} = 134,89 \cdot 0,6 = 80,93 \text{ кН,}$$

что значительно меньше суммарной силы сопротивления перемещению бульдозера. Поэтому разработка грунта второй категории с данными параметрами отвала и толщины стружки невозможна. Тем не менее, достижение данного показателя без уменьшения ширины резания является целевым фактором. Таким образом, в качестве критерия оптимизации предложено выбрать минимизацию сил сопротивления копанию.

На рис. 1 представлен профиль отвала с параметрами для оптимизации. В качестве начальных значений параметров оптимизации примем следующее:

- угол резания $\alpha = 50^\circ$;
- длина прямолинейной части $a = 250$;
- радиус кривизны отвала $R = 1000$ мм;
- угол установки отвала $\varepsilon = 80^\circ$.

Определять влияние выбранных факторов на величины сил сопротивления копанию позволяют разработанные авторами программное обеспечение и методика вычисления сил сопротивления копанию, основанная на имитационной модели рабочего оборудования.

В соответствии с данной методикой отвал бульдозера и призма волочения представляются в виде, взаимодействующих объектов, представленных на рис. 2.

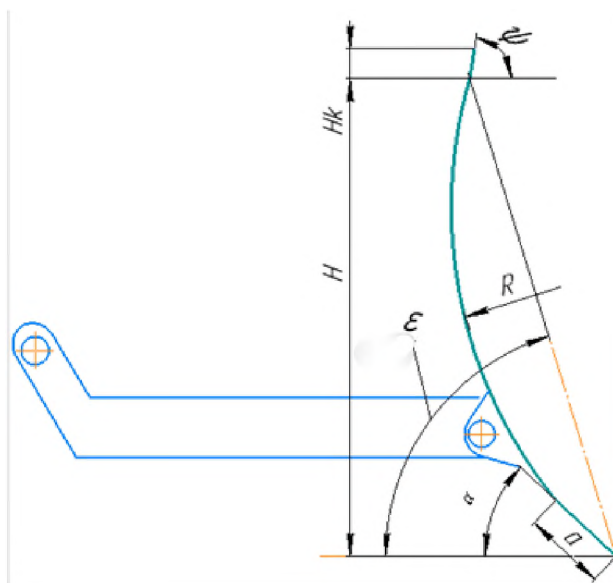


Рис. 1. Профиль отвала с параметрами, принятыми для оптимизации: a – длина прямолинейной части; α – угол резания; ε – угол установки отвала; R – радиус криволинейной части

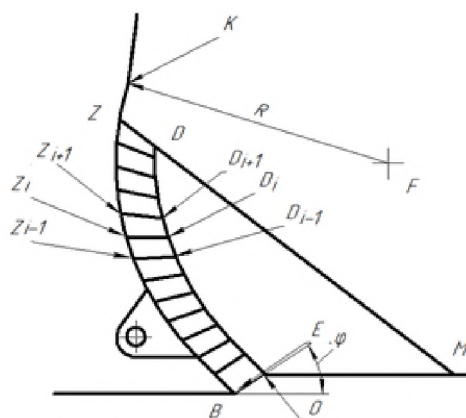


Рис. 2. Отвал с призмой волочения

Призма волочения на рис. 2 представлена многоугольником $BZDM$, в котором выделен условно неподвижный треугольник OMD , и условно подвижные сегменты $Z_i Z_{i+1} D_{i+1} D_i$. Такой подход позволяет определять силы, возникающие в призме волочения, нормальные и касательные силы, действующие на отвал от сегментов призмы волочения, силы, возникающие при сдвигах грунта по площадке сдвига BO . Подробно методики определения сил сопротивления копанью по данной методике изложены в публикациях [10-13].

Для определения зависимости сил сопротивления копанью от выбранных факторов варьирования зададим уровни факторов варьирования параметрами отвала.

В качестве функции отклика примем суммарные силы сопротивления копанью.

Предположим, что функция отклика будет описывать уравнением

$$F_k = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} \cdot X_{ii}^2 + \sum_{i=1}^{n-1} b_{ij} \cdot X_i \cdot X_j, \quad (9)$$

где $b_0 \dots b_i$, b_{ij} – коэффициенты регрессии; $X_1 \dots X_4$ – нормированные значения факторов варьирования.

Количество коэффициентов уравнения равно 15, таким образом, минимальное количество опытов может составлять 16 и более.

Определим число опытов полнофакторного эксперимента

$$n = 5^k, \quad (10)$$

где 5 – число уровней; k – число факторов, $k = 4$, тогда

$$n = 5^4 = 625.$$

В связи с большим числом опытов предлагается использовать матрицу дробнофакторного эксперимента с звездными плечами факторов и пятью уровнями варьирования.

Фактические и нормированные значения факторов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Нормированные и фактические значения факторов варьирования

Наименование фактора	Ед. изм.	Уровни факторов				
		$-w$	-1	0	1	$+w$
Угол резания, $\alpha(X1)$	град.	40	45	50	55	60
Длина прямолинейной части, $a(X2)$	мм	200	225	250	275	300
Радиус кривизны отвала, $R(X3)$	мм	800	900	1000	1100	1200
Угол установки отвала, $\varepsilon(X4)$	град.	70	75	80	85	90

Дробнофакторный эксперимент проведем с помощью имитационного моделирования с использованием программного обеспечения. Для вычислений примем параметры грунта, соответствующие третьей категории, которые представлены в табл. 3.

Матрица планирования дробнофакторного эксперимента с нормированными и действительными значениями факторов, а также значениями функций отклика, полученными в результате проведения имитационного эксперимента представлена в табл. 4.

Таблица 3

Принятые параметры грунта

Наименование параметра	Ед. изм.	Значение
Угол внутреннего трения	град.	28
Угол трения грунта по металлу	град.	23
Угол наклона призмы волочения к горизонту	град.	40
Удельное сцепление грунта ненарушенной структуры	Па	15
Удельное сцепление грунта нарушенной структуры	Па	1
Удельное сопротивление резанию	кПа	80
Коэффициент жесткости	кПа/м	3 000

Таблица 4

Матрица полнофакторного эксперимента с функциями отклика

№ опыта	$X1$	$X2$	$X3$	$X4$	$F_{\min}$	$F_{\max}$
1	+1	+1	+1	+1	86	96
2	-1	+1	+1	-1	73	86
3	+1	-1	+1	-1	66	75
4	-1	-1	+1	+1	124	137
5	+1	+1	-1	-1	82	93
6	-1	+1	-1	+1	82	86
7	+1	-1	-1	+1	86	96
8	-1	-1	-1	-1	78	89
9	0	0	0	+1,25	133	145
10	0	0	0	-1,25	74	84
11	0	0	+1,25	0	76	87
12	0	0	-1,25	0	88	99
13	0	+1,25	0	0	75	86
14	0	-1,25	0	0	75	86
15	+1,25	0	0	0	76	87
16	-1,25	0	0	0	116	131
17	0	0	0	0	76	87

Анализ табл. 4 показывает, что значения сил сопротивления копанию в зависимости от выбранных параметров профиля отвала могут изменяться от 74 до 137 кН, что показывает перспективность оптимизации по выбранным факторам.

На основании результатов опытов и функций математической статистики построено уравнение регрессии. В связи с малым количеством опытов не удалось определить коэффициенты регрессии в соответствии с принятым типом полинома, поэтому коэффициенты регрессии были рассчитаны для уравнения типа:

$$F_K = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} \cdot X_{ii}^2. \quad (11)$$

Рассчитанные значения коэффициентов регрессии: $b_0 = 98,84$; $b_1 = -7,37$; $b_2 = 2,34$; $b_3 = -3,73$; $b_4 = -11,7$; $b_5 = 1,66$; $b_6 = -7,26$; $b_7 = 12,81$; $b_8 = 6,5$.

На основании функции (11) и полученных коэффициентов регрессии построены зависимости функций отклика от каждого фактора варьирования при значениях остальных факторов равных нулю, минус 1 и плюс 1. На рис. 3 представлены изменения функции отклика от каждого фактора варьирования при нулевых значениях остальных факторов. На рис. 4 представлены зависимости функции отклика от фактов варьирования при значении остальных факторов, равном единице. На рис. 5 представлены зависимости функций отклика от каждого фактора варьирования при значениях остальных факторов, равных минус единице.

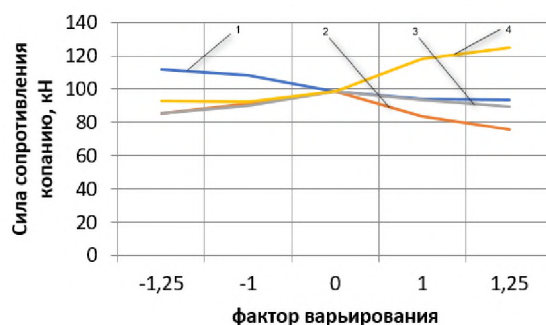


Рис. 3. Изменение факторов при нулевых значениях остальных факторов: 1 – X1, 2 – X2, 3 – X3, 4 – X4

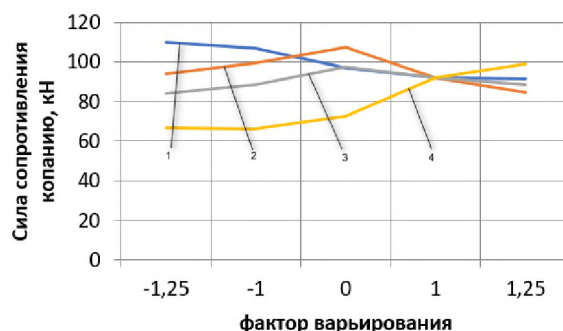


Рис. 4. Изменение факторов при значениях остальных факторов, равных единице: 1 – X1, 2 – X2, 3 – X3, 4 – X4

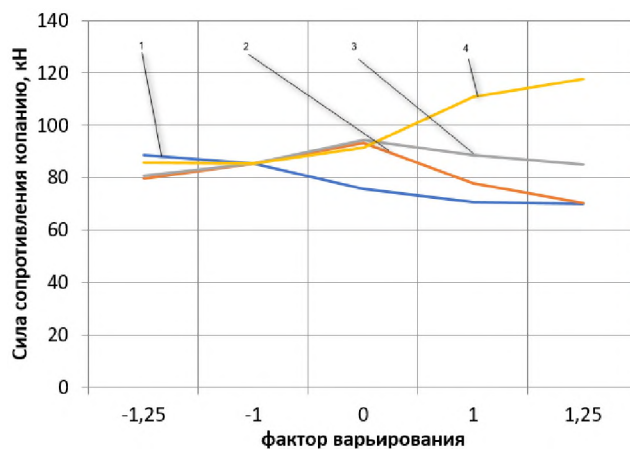


Рис. 5. Изменение факторов при значениях остальных факторов, равных минус единице: 1 – X1, 2 – X2, 3 – X3, 4 – X4

Анализ полученных зависимостей показывает, что:

- рекомендуется принять значение угла резания, близкое к максимальному, в пределах диапазона варьирования и равное 55°;

- предлагается установить длину прямолинейной части в максимальные значения, т. к. это обеспечит максимальную длину сменного элемента (ножа), по мере изнашивания ножа, силы сопротивления копанию будут увеличиваться, их можно будет уменьшить, перевернув нож (предлагается ориентировочная длина 300 мм);

- рекомендуется принять значение радиуса кривизны отвала максимальным (1100 мм), т. к. это уменьшает силы трения при подъеме грунта вверх по отвалу;

- рекомендуется принять угол установки отвала (73°).

При таких значениях факторов суммарная сила сопротивления копанию составит 58,8 кН, что на 26 % меньше сил сопротивления копанию, рассчитанных по общепринятой методике [2, 14] и позволяет максимально увеличить толщину стружки для принятых значений грунта, хотя и не дает возможности осуществлять копание грунта при толщине стружки 0,3 м.

Полученные результаты указывают на необходимость проведения оптимизационных работ с целью снижения сил сопротивления копанию или достижения других критериев при проектировании отвалов бульдозеров. Проведение имитационных исследований процесса копания грунта отвалом бульдозера с целью достижения минимальных значений сил сопротивления копанию, либо достижения других критериев, таких как максимальная производительность или максимальная эффективность процесса копания может увеличить эффективность рабочего оборудования бульдозера и машины в целом.

Список литературы

1. Артемьев К.А. Теория резания грунтов землеройными машинами: уч. пособие. Новосибирск, 1978. 104 с.
2. Ветров Ю.А. Сопротивление грунтов резанию. Киев: изд. Киев. ун-та, 1962. 96 с.
3. Домбровский Н.Г., Панкратов С.А. Землеройные машины. М.: Гостройиздат, 1961. 321 с.
4. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами. М.: Машиностроение, 1968. 198 с.
5. Чехов А.А., Гребеньков Д.В. Сравнение конструкции традиционного отвала бульдозера и отвала с челюстным захватом // Сб. науч. тр. 11-й всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участ. «Современные инновации в науке и технике». Курск, 2021. С. 253-256.
6. Горбунова М.А., Вахрушев С.И. Усовершенствование отвалов бульдозера и сравнение их производительности // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2018. Т. 2. С. 475-483.
7. Нураков С., Тулебекова А. Особенности процесса срезания грунта. / Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 7-2 (75). С. 119-122.
8. Демиденко А.И., Семкин Д.С., Сурженко Р.С. Повышение производительности бульдозерной техники и уменьшение энергоемкости процесса копания за счет использования отвала ковшевого типа // Сборник материалов IV Национальной научно-практической конференции «Образование. Транспорт. Инновации. Строительство». Омск, 2021. С. 8-13.
9. Махаматзяев Н.Ж. Повышение производительности бульдозера путём устранения прилипания грунта к отвалу / Махаматзяев Н.Ж., Вахрушев С.И. // Master's Journal, 2020. № 1. С. 161-166.
10. Берестов Е.И. Научные основы моделирования системы «Грунт – рабочее оборудование землеройных машин» в режиме послепольной разработки: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 20.11.98 / Е.И. Берестов; Москов. гос. строит. ун-т. – М., 1998. 44 с.
11. Берестов Е.И. Методика расчета геометрических параметров призмы волочения на отвале бульдозера / Е.И. Берестов, И.В. Лесковец // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та, 2009. № 2. С.6-12.
12. Берестов Е.И. Определение угла наклона площадки большого сдвига при копании отвальным рабочим органом / Е. И. Берестов, И. В. Лесковец // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. Разд. Механизация и сельскохозяйственное машиностроение. 2010. № 1. С.148-155.
13. Берестов Е.И. Методы определения усилий сопротивления копанию рабочим оборудованием бульдозера / Е. И. Берестов, И. В. Лесковец, В. В. Пеклин // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Машиностроение. 2010. № 4. С. 58-63.
14. Довгяло В.А., Бочкарев Д.И. Дорожно-строительные машины. Часть I: Машины для земляных работ. Гомель: БелГУТ, 2010. 250 с.

Лесковец Игорь Владимирович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, leskovets1966@mail.ru, Республика Беларусь, Могилев, Межгосударственное образовательное учреждение Белорусско-Российский университет,

Латицкий Александр Владимирович, старший преподаватель, lapielektromotor@rambler.ru, Республика Беларусь, Могилев, Межгосударственное образовательное учреждение Белорусско-Российский университет

OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF THE BULLDOZER BLADE PROFILE ACCORDING TO THE CRITERION OF MINIMIZING DIGGING RESISTANCE FORCES

I.V. Leskavets, V.A. Lapitski

The purpose of the presented work is to reduce the forces of resistance to digging by the blade of the working equipment of the bulldozer by optimizing the parameters of the blade profile. To achieve this goal, specialized software is used that uses the scientific foundations of modeling the operation of the soil-working equipment system by determining the limiting conditions of the soil. The analysis of the obtained dependencies allowed us to establish the optimal values of the variation factors, in which the forces of resistance to digging decreased by 26% compared with the variant in which the forces of resistance to digging were determined by a generally accepted method.

Key words: bulldozer, working equipment, dump, digging resistance forces, modeling.

Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

Leskavets Igor Vadimovich, candidate of technical sciences, docent, head of the department, leskovets1966@mail.ru, Republic of Belarus, Mogilev, Interstate Educational Institution of the Belarusian-Russian University,

Lapitski Vladimir Aleksandrovich, senior lecturer, lapielektromotor@rambler.ru, Republic of Belarus, Mogilev, Interstate Educational Institution of the Belarusian-Russian University