

УДК 624.132.3

С.И. Вахрушев, Ю.А. Исакова

S.I. Vakhrushev, Yu.A. Isakova

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

Perm National Research Polytechnic University

ИССЛЕДОВАНИЕ СПАРЕННОЙ РАБОТЫ БУЛЬДОЗЕРОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ГРУНТОВ РАЗЛИЧНЫХ КАТЕГОРИЙ

RESEARCH OF THE BULLDOZERS TEAMWORK ON SOILS OF VARIOUS CATEGORIES

Рассмотрена спаренная работа двух и трех бульдозеров и ее влияние на эксплуатационную производительность машины при разработке грунтов I–III категорий. С учетом грунтовых свойств и конструктивных особенностей выбранного бульдозера произведен расчет тяговых усилий, сопротивлений, действующих на машину, сменной эксплуатационной производительности. По расчетным данным произведен анализ, сформулированы соответствующие выводы и рекомендации.

Ключевые слова: земляные работы, бульдозер, отвал, спаренная работа, тяговый расчет, сопротивление грунта, эксплуатационная производительность, потери грунта, уравнение регрессии.

Teamwork of two and three bulldozers and its impact on the machine working capacity in the development of soil I–III categories are considered in the article. In view of the ground properties and design features of the chosen bulldozer calculated the traction, resistance acting on the machine, work capacity. According to the obtained settlement data the analysis is made, the corresponding conclusions and recommendations are formulated.

Keywords: earthwork, the bulldozer, a blade, bulldozers teamwork, traction calculation, soil resistance, work capacity, soil losses, the regression equation.

В настоящее время земляные работы, связанные с разработкой, уплотнением и перемещением грунта, являются неотъемлемой частью как дорожного, так и других видов строительства. Их удельный вес в общем объеме строительно-монтажных работ составляет до 15 % по стоимости и до 20 % по трудоемкости. При этом около 85 % разработок ведется механическим способом [1]. Сроки проведения земляных работ напрямую связаны с производительностью средств механизации. Одной из основных машин в планировочном комплексе является бульдозер, поэтому вопрос, связанный с увеличением его производительности, является достаточно актуальным на сегодняшний день.

Существуют различные способы увеличения эффективности работы бульдозеров. К конструкционным методам относятся изменение формы отвала [2], применение поворотных отвалов и отвалов с окрылками, гидро-

пневмоаккумулирующих систем [3]. Среди технологических приемов выделяют траншейный способ разработки грунта, работу бульдозера под уклон и разработку грунта с промежуточным складированием в валки через каждые 20–25 м.

На достаточно широких строительных площадках со спокойным рельефом (в том числе при зачистке дна котлованов, при гидротехническом строительстве), где есть возможность прохода двух параллельно расположенных машин, также применяют спаренную работу бульдозеров (рис. 1, а). При такой схеме два (реже три) бульдозера двигаются рядом с одинаковой скоростью на расстоянии 0,25–0,5 м один от другого. Величина зазора между отвалами зависит от типа перемещаемого грунта: для сыпучих интервал не должен превышать 25 см, а для связных, комковатых этот интервал может быть увеличен до 0,5 м. При этом потери грунта через боковые валики уменьшаются почти на 50 % за счет дополнительно транспортируемого объема (рис. 1, б). В связи с этим спаренная работа двух или трех бульдозеров позволяет увеличить дальность перемещения разрабатываемого грунта [4].

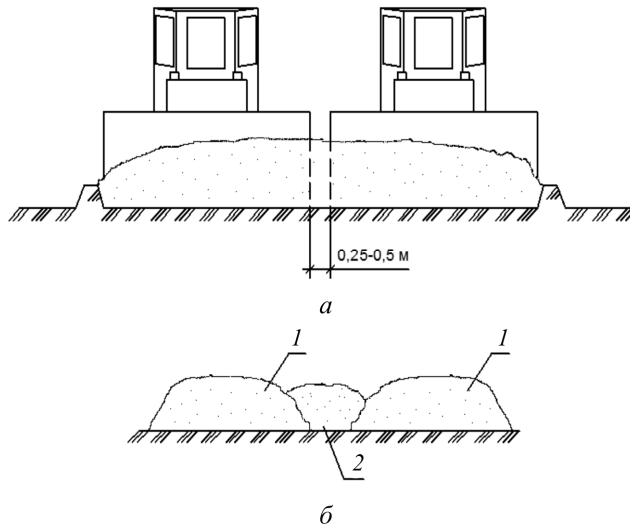


Рис. 1. Спаренная работа бульдозеров: а – схема движения; б – транспортируемый грунт; 1 – грунт, транспортируемый при одиночной работе бульдозеров; 2 – дополнительный объем грунта

Целесообразно рассмотреть влияние спаренной работы бульдозеров на примере строительной площадки со средним уклоном рельефа местности $i = 0,01$ и средней дальностью транспортирования грунта $L_{\text{ср}} = 120$ м.

На производительность машины при прочих равных условиях большое влияние оказывают прочностные характеристики грунта (угол естественного

откоса, удельное сопротивление резанию), а также показатели его состояния (плотность, влажность). Исследуемые типы грунтов и их свойства приведены в табл. 1 [5].

Таблица 1

Физико-механические свойства грунтов

Характеристика грунта	Грунт растительного слоя	Песок средней крупности	Супесь полутвердая	Глина жирная
Группа в зависимости от трудности разработки бульдозерами	I	II	II	III
Влажность	Сухой	Влажный	Влажный	Влажный
Угол естественного откоса ψ , град	40	35	30	35
Способ набора грунта (рис. 2)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>b</i>
Удельное сопротивление резанию K , МПа	0,09	0,08	0,10	0,20
Объемная масса плотного грунта γ , т/м ³	1,40	1,50	1,60	1,72
Коэффициент трения грунта о грунт μ	0,6	0,70	0,65	0,80
Коэффициент трения грунта о сталь μ_1	0,45	0,50	0,45	0,60
Коэффициент сцепления гусениц бульдозера с грунтом ϕ	0,80	0,75	0,85	0,9
Коэффициент сопротивления качению f	0,10	0,15	0,12	0,08

Подбор ведущей машины. Ориентировочный выбор марки и модели бульдозера для выполнения земляных работ произведен по практическим рекомендациям в зависимости от среднего расстояния перемещения грунта [6]. В качестве ведущей планировочной машины рассмотрен один из самых современных бульдозеров – Shantui SD22. Основные параметры и технические характеристики, требуемые для расчета, представлены в табл. 2 [7].

Определение критического тягового усилия для бульдозера. Для расчета производительности определены критические тяговые усилия бульдозера [8]. Сила тяги на первой и второй передачах в зависимости от мощности базового трактора вычислена по формуле

$$T_{Ni} = 3,6 \cdot \frac{N \cdot K_{\text{заг}} \cdot \eta}{v_i \cdot (1 - \delta)}, \quad (1)$$

где T_{Ni} – тяговое усилие бульдозера на i -й передаче, кН; 3,6 – переводной коэффициент из км/ч в м/с; N – номинальная мощность двигателя, кВт, при-

нята по табл. 2; $K_{\text{заг}}$ – коэффициент загрузки двигателя ($K_{\text{заг}} = 0,8$ для тракторов с гидродинамической трансмиссией); η – коэффициент полезного действия трансмиссии и движителя ($\eta = 0,8$); v_i – скорость движения трактора без загрузки на i -й передаче, км/ч, принята по табл. 2; δ – среднее значение коэффициента буксования при рабочем ходе бульдозера ($\delta = 0,2$ для бульдозера на базе гусеничного трактора).

Таблица 2

Функциональные параметры бульдозера Shantui SD22

Характеристика	Единицы измерения	Значение
Мощность двигателя (N)	кВт / л.с.	162 / 220
Тип трансмиссии	–	Гидромеханическая
Длина	м	5,750
Ширина	м	3,725
Высота	м	3,395
Рабочий вес с оборудованием, m	т	27,0
Ширина колеи	м	2,00
Тип отвала	–	Прямой, поворотный
Ширина отвала B	м	3,725
Высота отвала H	м	1,315
Скорость движения v_1 (I передача)	км/ч	3,6 (4,3)
Скорость движения v_2 (II передача)		6,5 (7,7)
Скорость движения v_3 (III передача)		11,2 (13,2)
Максимальное заглубление отвала h	м	0,540
Максимально допустимый уклон	град	30

Примечание: в скобках указаны значения для порожнего хода.

Сила тяги в зависимости от типа грунта (от сцепления с грунтом) определена по формуле

$$T_{\phi} = m \cdot g \cdot \phi, \quad (2)$$

где T_{ϕ} – тяговое усилие по сцеплению, кН; m – рабочий вес бульдозера, т (с отвалом и рыхлителем), принят по табл. 2; g – ускорение свободного падения ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$); ϕ – коэффициент сцепления гусениц бульдозера с грунтом, определен по табл. 1. Расчетные тяговые усилия сведены в табл. 3.

Проанализировав данные табл. 3, для дальнейшего расчета для всех типов грунтов в качестве критического принято наименьшее тяговое усилие из расчета по мощности двигателя.

Таблица 3

Расчет тяговых усилий

Максимальная сила тяги	Единицы измерения	Значение
Из расчета по мощности:		
– на первой передаче T_{N1}	кН	129,6
– на второй передаче T_{N2}	кН	71,78
Из расчета по сцеплению:		
– грунт растительного слоя	кН	211,90
– песок средней крупности	кН	198,65
– супесь полутвердая	кН	225,14
– глина жирная	кН	238,38

Определение средней толщины срезаемого слоя. В процессе работы на бульдозер и отдельные его части действуют следующие сопротивления:

- сопротивление перемещению бульдозера при наборе грунта;
- сопротивление перемещению призмы волочения;
- сопротивление перемещению грунта вверх по отвалу [9].

Для обеспечения непрерывной и эффективной работы необходимо выбрать подходящий способ резания. Для легких грунтов I, II категорий, а также при снятии растительного слоя, когда тяговое усилие трактора используется не полностью, возможен прямоугольный способ набора грунта (см. рис. 2, а). При такой ленточной форме резания заглублиение отвала (h) постоянно и не превышает 10–15 см. Для остальных типов грунтов для достижения наибольшей эффективности от использования машины тяговое усилие трактора должно быть переменным и близким к номинальному. В связи с этим начинать операцию набора грунта следует при максимальном заглублиении отвала, уменьшая это заглублиение по мере образования перед отвалом достаточного количества грунта. Стружка при этом получает форму клина (см. рис. 2, б) [10].

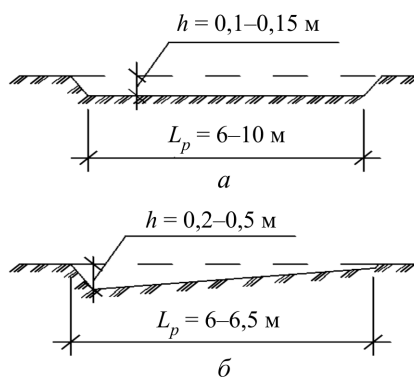


Рис. 2. Способы набора грунта бульдозером:
а – прямоугольный; б – клиновидный

Толщина стружки в начале и конце операции резания, а также средняя толщина срезаемого слоя для каждого типа грунта определены в зависимости от действующих на бульдозер сопротивлений. Расчетная схема набора грунта на отвал бульдозера представлена на рис. 3.

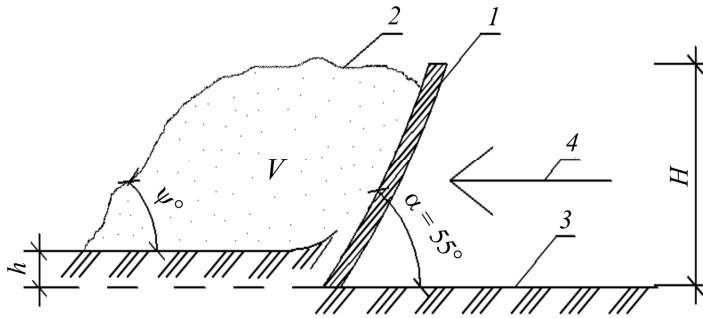


Рис. 3. Расчетная схема набора грунта на отвал:
1 – отвал; 2 – транспортируемый грунт; 3 – срезаемый грунт;
4 – направление движения бульдозера; ψ – угол естественного откоса; α – угол резания, $\alpha = 55^\circ$

Сопротивление, действующее на бульдозер, равно

$$W_1 = m \cdot g \cdot (f \pm i), \quad (3)$$

где f – коэффициент сопротивления качению, принят по табл. 1; i – уклон пути (знак «-» – при работе под уклон, знак «+» – при работе на подъеме). Набор грунта обычно производится на горизонтальном участке, в этом случае $i = 0$ [8].

Максимальная толщина стружки (m), срезаемая в начале набора, равна

$$h_{\max} = \frac{T_{N1} - W_1}{B \cdot K \cdot 10^3}, \quad (4)$$

где B – ширина отвала, м, принята по табл. 2; K – удельное сопротивление резанию, МПа, принято по табл. 1. При этом учтено, что толщина стружки не должна превышать значение максимального заглубления отвала по техническим характеристикам бульдозера (см. табл. 2).

Объем призмы волочения, m^3 , без учета первоначального разрыхления грунта определен по формуле

$$V = \frac{B \cdot H^2}{2 \cdot \operatorname{tg} \psi} \cdot k_{к.о.}, \quad (5)$$

где H – высота отвала, м, принята по табл. 2; ψ – угол естественного откоса грунта, градусы, принят по табл. 1; $k_{к.о}$ – коэффициент, учитывающий конфигурацию отвала. Для плоского отвала $k_{к.о} = 1$, в случаях полусферического и сферического отвалов для нахождения $k_{к.о}$ необходим расчет по дополнительным формулам [2].

Сопротивление перемещению призмы волочения, кН, определено по формуле

$$W_2 = V \cdot \gamma \cdot g \cdot \mu, \quad (6)$$

где γ – объемная масса плотного грунта, т/м³; μ – коэффициент трения грунта о грунт, принимаем по табл. 1.

Сопротивление от перемещения грунта вверх по отвалу, кН, вычислено по формуле

$$W_3 = V \cdot \gamma \cdot g \cdot \cos^2 \alpha \cdot \mu_1, \quad (7)$$

где α – угол резания, $\alpha = 55^\circ$; μ_1 – коэффициент трения грунта о сталь, принят по табл. 1.

Минимальная толщина стружки, срезаемая в конце операции набора, м, равна

$$h_{\min} = \frac{T_{N1} - W_1 - W_2 - W_3}{L \cdot K \cdot 10^3}. \quad (8)$$

Средняя толщина стружки, принимаемая в последующий расчет, равна

$$h_{\text{cp}} = \frac{h_{\max} + h_{\min}}{2}. \quad (9)$$

Результаты расчета по формулам (3)–(9) сведены в табл. 4.

Таблица 4

Определение средней толщины срезаемой стружки

Характеристика, единицы измерения	Грунт растительного слоя	Песок средней крупности	Супесь полутвердая	Глина жирная
V , м ³	3,84	4,60	5,58	4,60
W_1 , кН	–	39,73	31,784	21,19
W_2 , кН	–	47,37	56,91	62,08
W_3 , кН	–	11,13	12,15	15,32
K , МПа	–	0,08	0,1	0,2
h_{\max} , м	–	0,302	0,263	0,146
h_{\min} , м	–	0,105	0,077	0,042
h_{cp}, м	0,15	0,203	0,170	0,094

Расчет производительности бульдозера. Сменная эксплуатационная производительность работы бульдозера ($\text{м}^3/\text{смена}$) вычислена по формуле

$$\Pi_{\text{см. экспл}} = \frac{3600 \cdot V_1 \cdot K_y \cdot K_{\text{вр}} \cdot c}{t_{\text{ц}} \cdot K_p}, \quad (10)$$

где 3600 – переводной коэффициент из часов в секунды; V_1 – объем призмы волочения грунта в конце операции груженого хода с учетом его потерь при транспортировке, м^3 ; K_y – коэффициент, учитывающий влияние уклона местности, для $i = 0,01$ $K_y = 1,04$; $K_{\text{вр}}$ – коэффициент использования машины во времени, $K_{\text{вр}} = 0,8-0,9$ [10] (в расчете предполагается, что $K_{\text{вр}}$ бульдозера при его одиночной работе больше, чем при совместной); c – продолжительность рабочей смены, $c = 8$ ч; $t_{\text{ц}}$ – время рабочего цикла бульдозера, с; K_p – коэффициент первоначального разрыхления грунта, определен согласно [11].

Считая, что при совместной работе бульдозеров предотвращаются потери грунта с одной стороны отвала, рассчитан объем призмы волочения в конце операции груженого хода V_1 , м^3 .

При одиночной работе бульдозера

$$V_1 = V \cdot K_{\text{п}}, \quad (11)$$

где $K_{\text{п}}$ – коэффициент потерь грунта при транспортировке, зависит от типа грунта и дальности перемещения, рассчитан по формуле

$$K_{\text{п}} = 1 - \beta \cdot L_{\text{ср}}, \quad (12)$$

где β – коэффициент, учитывающий вид и состояние грунта, принят по табл. 1.

При этом потери объема транспортируемого грунта, м^3 , равны

$$\Delta V = V - V_1. \quad (13)$$

При совместной работе двух бульдозеров:

– потери объема при транспортировании грунта, м^3 :

$$\Delta V = \frac{V - V \cdot K_{\text{п}}}{2}; \quad (14)$$

– объем призмы волочения с учетом потерь, м^3 :

$$V_1 = V - \Delta V. \quad (15)$$

При совместной работе трех бульдозеров:

– потери объема при транспортировании грунта для бульдозеров, идущих по бокам, м^3 , вычислены по формуле (14), для бульдозера посередине считается $\Delta V = 0$;

– объем призмы волочения с учетом потерь, м^3 :

$$V_1 = \frac{V + 2 \cdot (V - \Delta V)}{3}. \quad (16)$$

Рабочий цикл бульдозера (рис. 4) с гидромеханической трансмиссией (без учета времени на переключение передач) состоит из следующих компонентов:

- времени набора грунта $t_{\text{н}}$, с;
- времени груженого хода (перемещения грунта к месту укладки) $t_{\text{г.х}}$, с;
- времени на повороты машины $t_{\text{п}} = 10\text{--}12$ с (в расчете учитывается, что время на поворот при совместной работе больше, чем при одиночной);
- времени порожнего хода $t_{\text{п.х}}$, с [10].

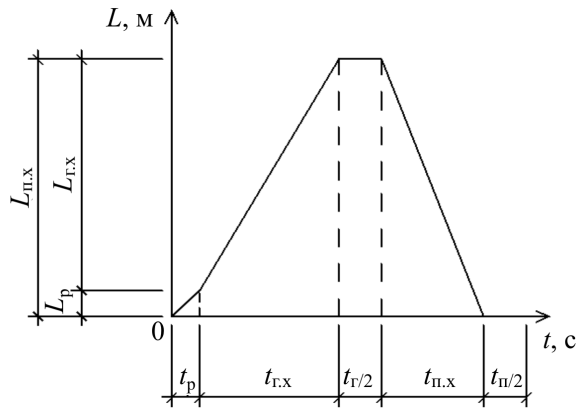


Рис. 4. Рабочий цикл бульдозера

Время на выполнение каждой отдельной технологической операции (с) зависит от скорости движения машины и длины пути и вычислено по формулам

$$t_{\text{н}} = \frac{3,6 \cdot L_{\text{н}} \cdot K_{\text{уск}}^{\text{I}}}{v_{\text{н}}}, \quad (17)$$

$$t_{\text{г.х}} = \frac{3,6 \cdot L_{\text{г.х}} \cdot K_{\text{уск}}^{\text{II}}}{v_{\text{г.х}}}, \quad (18)$$

$$t_{п.х} = \frac{3,6 \cdot L_{п.х} \cdot K_{уск}^{IV}}{v_{п.х}}, \quad (19)$$

где $K_{уск}^{I(II, III)}$ – коэффициент ускорения, замедления и переключения передач, на первой передаче $K_{уск}^I = 1$ (операция набора грунта), на второй передаче $K_{уск}^{II} = 1$ (операция транспортирования грунта), на четвертой передаче $K_{уск}^{IV} = 1,36$ (порожний ход); $v_{н(г.х, п.х)}$ – скорости движения бульдозера, км/ч, приняты по табл. 2.

Длины пути при выполнении отдельных элементов цикла, м:

– при наборе грунта на отвал:

$$L_{н} = \frac{K_1 \cdot V}{B_{отв} \cdot h_{ср}}, \quad (20)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий разрыхление грунта и наполнение геометрического объема призмы волочения, $K_1 = 1,2-1,4$;

– при транспортировании грунта:

$$L_{г.х} = L_{ср} - L_p; \quad (21)$$

– при холостом ходе:

$$L_{п.х} = L_{ср}. \quad (22)$$

Так как при совместной работе бульдозеров увеличивается объем транспортируемого грунта, тяговое усилие бульдозера может быть недостаточным для преодоления сопротивления его перемещению. Вследствие этого необходимо будет уменьшить скорость передвижения машины, что в дальнейшем отразится на ее производительности. С целью определения максимальной скорости передвижения выбранного бульдозера при груженом ходе проведена проверка достаточности тяговой мощности по представленному ниже алгоритму.

1. Определяется средний объем призмы волочения, m^3 :

$$V_{ср} = \frac{V + V_1}{2}. \quad (23)$$

2. Определяется средний вес призмы волочения, кН:

$$G_{ср} = V_{ср} \cdot \gamma \cdot g. \quad (24)$$

3. Определяется сопротивление грузеного хода бульдозера с учетом уклона пути, кН:

$$\sum W_{г.х} = m \cdot g \cdot (f + i) + G_{ср} \cdot (\mu + i). \quad (25)$$

В формуле (25) учитывается работа бульдозера под уклон ($i < 0$). После определения полного сопротивления, возникающего при транспортировании грунта, проверяется выполнение неравенства

$$\sum W_{г.х} \leq T_{N2}. \quad (26)$$

4. При выполнении условия (26) расчет сменной эксплуатационной производительности ведется по номинальной скорости движения бульдозера на второй передаче. Если данное условие не выполняется, вычисляется максимально допустимая скорость при перемещении грунта по формуле

$$v'_2 = 3,6 \cdot \frac{N \cdot K_{заг} \cdot \eta}{\sum W_{г.х} \cdot (1 - \delta)}. \quad (27)$$

Расчеты по формулам (10)–(25) сведены в табл. 5–10.

Таблица 5

Расчет эксплуатационной производительности при одиночной работе бульдозера

Операция	Параметр, единицы измерения	Грунт растительного слоя	Песок средней крупности	Супесь полутвердая	Глина жирная
Набор грунта на отвал	$h_{ср}$, м	0,150	0,203	0,170	0,094
	V , м ³	3,838	4,559	5,578	4,599
	K_1	1,3	1,4	1,2	1,2
	L_p , м	8,93	8,44	10,57	15,76
	$K_{уск}^{(I)}$	1	1	1	1
	v_1 , км/ч	3,6	3,6	3,6	3,6
	t_p , с	8,93	8,44	10,57	15,76
Перемещение грунта	$K_{п}$, б/р	0,52	0,4	0,52	0,64
	V_1 , м ³	1,996	1,824	2,901	2,943
	$L_{г.х}$, м	111,07	111,56	109,43	104,24
	$K_{уск}^{(II)}$	1	1	1	1
	v_2 , км/ч	6,5	6,5	6,5	6,5
	$t_{г.х}$, с	61,52	61,79	60,61	57,73
Поворот	$t_{пов}$, с	10	10	10	10

Окончание табл. 5

Операция	Параметр, единицы измерения	Грунт растительного слоя	Песок средней крупности	Супесь полутвердая	Глина жирная
Порожний ход	$L_{п.х.}$, м	120	120	120	120
	$K_{уск}^{(III)}$	1,18	1,18	1,18	1,18
	v_3 , км/ч	11,2	11,2	11,2	11,2
	$t_{п.х.}$, с	45,51	45,51	45,51	45,51
Расчет производительности	$t_{ц.}$, с	125,96	125,74	126,69	129,01
	K_v	1,04	1,04	1,04	1,04
	$K_{вр}$	0,9	0,9	0,9	0,9
	K_p	1,23	1,13	1,15	1,26
	c , ч	8	8	8	8
	$P_{см. эксп.}$, м ³ /смена	347,25	345,97	536,67	488,12

Таблица 6

Проверка достаточности тяговой мощности при одиночной работе бульдозера

Параметр	Единицы измерения	Грунт растительного слоя	Песок средней крупности	Супесь полутвердая	Глина жирная
V	м ³	3,838	4,559	5,578	4,599
ΔV	м ³	1,842	2,735	2,677	1,656
V_1	м ³	1,996	1,824	2,901	2,943
$V_{ср}$	м ³	2,917	3,191	4,239	3,771
i	б/р	0,01	0,01	0,01	0,01
G	кН	264,87	264,87	264,87	264,87
f	б/р	0,10	0,15	0,12	0,08
$G_{ср}$	кН	40,06	46,96	66,54	63,63
μ	б/р	0,6	0,7	0,65	0,8
$\sum W_{г.х.}$	кН	47,47	69,48	71,72	68,81
Максимально допустимая скорость движения груженого хода при $T_{N2} = 71,72$ кН					
v_2'	км/ч	6,5	6,5	6,5	6,5

Таблица 7

Расчет эксплуатационной производительности при совместной работе двух бульдозеров

Операция	Параметр, единицы измерения	Грунт растительного слоя	Песок средней крупности	Супесь полутвердая	Глина жирная
Набор грунта на отвал	$h_{ср.}$, м	0,150	0,203	0,170	0,094
	V , м ³	3,838	4,559	5,578	4,599
	K_1	1,3	1,4	1,2	1,2
	L_p , м	8,93	8,44	10,57	15,76

Окончание табл. 7

Операция	Параметр, единицы измерения	Грунт растительного слоя	Песок средней крупности	Супесь полутвердая	Глина жирная
	$K_{\text{уск}}^{(I)}$	1	1	1	1
	v_1 , км/ч	3,6	3,6	3,6	3,6
	t_p , с	8,93	8,44	10,57	15,76
Перемещение грунта	$K_{\text{п}}, \text{б/р}$	0,52	0,4	0,52	0,64
	V_1 , м ³	2,917	3,191	4,239	3,771
	$L_{\text{т.х.}}$, м	111,07	111,56	109,43	104,24
	$K_{\text{уск}}^{(II)}$	1	1	1	1
	v_2 , км/ч	6,5	6,1	5,9	6,2
	$t_{\text{т.х.}}$, с	61,52	65,84	66,77	60,53
Поворот	$t_{\text{пов.}}$, с	12	12	12	12
Порожний ход	$L_{\text{п.х.}}$, м	120	120	120	120
	$K_{\text{уск}}^{(III)}$	1,18	1,18	1,18	1,18
	v_3 , км/ч	11,2	11,2	11,2	11,2
	$t_{\text{п.х.}}$, с	45,51	45,51	45,51	45,51
Расчет производительности	$t_{\text{ц.}}$, с	127,96	131,79	134,86	133,80
	K_v	1,04	1,04	1,04	1,04
	$K_{\text{вр}}$	0,85	0,85	0,85	0,85
	K_p	1,23	1,13	1,15	1,26
	c , ч	8	8	8	8
	$P_{\text{см. эксп.}}$, м ³ /смена	471,83	545,56	695,94	569,50

Таблица 8

Проверка достаточности тяговой мощности при спаренной работе двух бульдозеров

Параметр	Единицы измерения	Грунт растительного слоя	Песок средней крупности	Супесь полутвердая	Глина жирная
V	м ³	3,838	4,559	5,578	4,599
ΔV	м ³	0,921	1,368	1,339	0,828
V_1	м ³	2,917	3,191	4,239	3,771
$V_{\text{ср}}$	м ³	3,377	3,875	4,909	4,185
i	б/р	0,01	0,01	0,01	0,01
G	кН	264,87	264,87	264,87	264,87
f	б/р	0,10	0,15	0,12	0,08
$G_{\text{ср}}$	кН	46,39	57,02	77,05	70,62
μ	б/р	0,6	0,7	0,65	0,8
$\sum W_{\text{т.х.}}$	кН	51,21	76,43	78,45	74,33
Максимально допустимая скорость движения груженого хода при $T_{N2} = 71,72$ кН					
v_2'	км/ч	6,5	6,1	5,9	6,2

Таблица 9

Расчет эксплуатационной производительности при совместной работе
трех бульдозеров

Операция	Параметр, единицы измерения	Грунт растительного слоя	Песок средней крупности	Супесь полутвердая	Глина жирная
Набор грунта на отвал	h_{cp} , м	0,150	0,203	0,170	0,094
	V , м ³	3,838	4,559	5,578	4,599
	K_1	1,3	1,4	1,2	1,2
	L_p , м	8,93	8,44	10,57	15,76
	$K_{уск}^{(I)}$	1	1	1	1
	v_1 , км/ч	3,6	3,6	3,6	3,6
	t_p , с	8,93	8,44	10,57	15,76
Перемещение грунта	$K_{пв}$, б/р	0,52	0,4	0,52	0,64
	V_1 , м ³	3,224	3,647	4,686	4,047
	$L_{г.х}$, м	111,07	111,56	109,43	104,24
	$K_{уск}^{(II)}$	1	1	1	1
	v_2 , км/ч	6,5	5,9	5,7	6,1
	$t_{г.х}$, с	61,52	68,07	69,11	61,52
Поворот	$t_{пов}$, с	12	12	12	12
Порожний ход	$L_{п.х}$, м	120	120	120	120
	$K_{уск}^{(III)}$	1,18	1,18	1,18	1,18
	v_3 , км/ч	11,2	11,2	11,2	11,2
	$t_{п.х}$, с	45,51	45,51	45,51	45,51
Расчет производительности	$t_{ц}$, с	127,96	134,03	137,20	134,79
	K_v	1,04	1,04	1,04	1,04
	$K_{вр}$	0,8	0,8	0,8	0,8
	K_p	1,23	1,13	1,15	1,26
	c , ч	8	8	8	8
	$P_{см. эксп}$, м ³ /смена	490,82	577,05	711,59	570,98

Таблица 10

Проверка достаточности тяговой мощности при спаренной работе
трех бульдозеров

Параметр	Единицы измерения	Грунт растительного слоя	Песок средней крупности	Супесь полутвердая	Глина жирная
V	м ³	3,838	4,559	5,578	4,599
ΔV	м ³	0,614	0,912	0,892	0,552
V_1	м ³	3,224	3,647	4,686	4,047
V_{cp}	м ³	3,531	4,103	5,132	4,323
i	б/р	0,01	0,01	0,01	0,01
G	кН	264,87	264,87	264,87	264,87
f	б/р	0,10	0,15	0,12	0,08

Окончание табл. 10

Параметр	Единицы измерения	Грунт растительного слоя	Песок средней крупности	Супесь полутвердая	Глина жирная
G_{cp}	кН	48,49	60,38	80,55	72,94
μ	б/р	0,6	0,7	0,65	0,8
$\sum W_{г.х}$	кН	52,45	78,74	80,69	76,17
Максимально допустимая скорость движения груженого хода при $T_{N2} = 71,72$ кН					
v_2'	км/ч	6,5	5,9	5,7	6,1

По полученным данным построены гистограммы, отображающие тенденции изменения скорости перемещения грунта (рис. 5) и сменной эксплуатационной производительности (рис. 6) для работы одной, двух и трех машин.

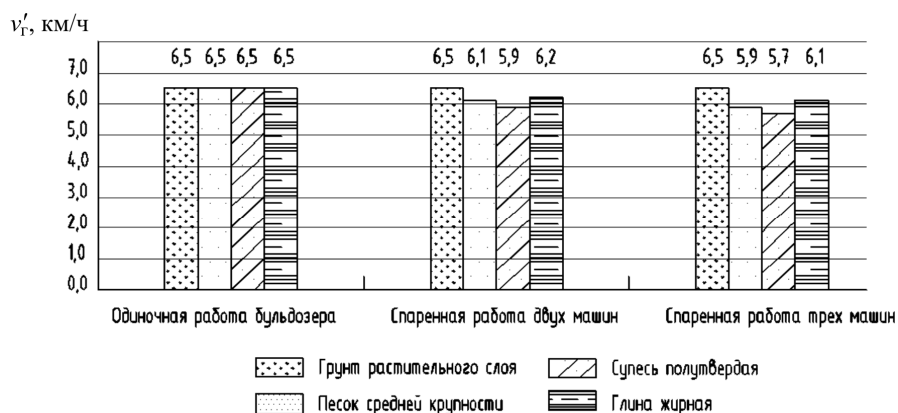


Рис. 5. Изменение скорости перемещения грунта

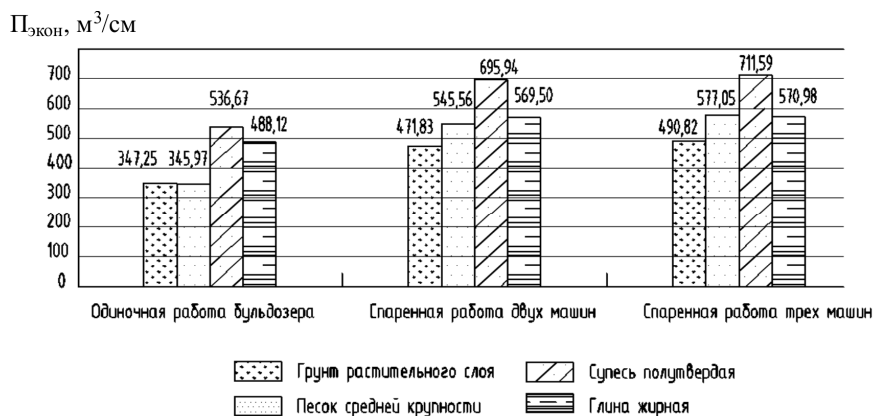


Рис. 6. Изменение сменной эксплуатационной производительности бульдозера

Расчет показал, что в среднем при спаренной работе двух и трех бульдозеров объем транспортируемого грунта увеличивается соответственно в 1,3 и 1,4 раза. Причем наибольшие коэффициенты увеличения объема (до 1,6) соответствуют тем грунтам, потери которых при одиночной работе велики (песок). Подробнее рассмотрим изменение скорости груженого хода. Для этого построим уравнения регрессии [12]. За целевую функцию принимаем величину скорости транспортирования грунта, в качестве независимого аргумента x – объем призмы волочения.

В качестве аппроксимирующей функции используем полином первой степени:

$$P^m(x), m = 1. \quad (28)$$

Уравнения регрессии имеют вид:

- для грунта растительного слоя: $v_2' = 6,5$;
- для песка средней крупности: $v_2' = -0,6x + 8,5$;
- для супеси: $v_2' = -0,9x + 10,3$;
- для глины: $v_2' = -0,7x + 9,2$.

Выводы. Анализируя полученные зависимости, делаем вывод, что в связи с увеличением объема призмы волочения, которое достигается за счет совместной работы машин, требуется снижение скорости рабочих операций, особенно для грунтов с большим удельным весом и большими коэффициентами трения. Легкие грунты, такие как грунт растительного слоя, не требуют уменьшения скорости. В среднем же при спаренной работе двух бульдозеров скорость груженого хода уменьшается на 0,325 км/ч, что составляет 5 % от номинальной скорости, а при совместной работе трех машин – на 0,45 км/ч, что составляет 6,9 % от номинальной скорости.

Сочетание всех факторов работы бульдозера и эффективность его использования отражаются в значении сменной эксплуатационной производительности (см. рис. 6). При спаренной работе двух бульдозеров наблюдается значительное увеличение производительности машины, однако при совместной работе трех бульдозеров разница в производительности уменьшается. Самый большой эффект от производства работ по такой технологии достигается при транспортировании сыпучих грунтов. В среднем же сменная эксплуатационная производительность увеличивается при работе двух машин на 30–35 %, трех – на 39–40 %.

Таким образом, расчеты показывают, что совместная работа бульдозеров может привести к значительному увеличению их производительности. Причем наиболее удобным и эффективным является сочетание именно двух рядом идущих машин. Однако в реальных условиях такого положительного

эффекта достичь не удастся. Это может быть связано с небольшими потерями грунта через зазор между отвалами, а также потерями грунта, не учитываемыми при расчете. Кроме того, время, затрачиваемое на поворот двух машин, может быть значительно больше принятого в данном расчете, а скорости производимых операций – значительно меньше номинальных, вследствие чего увеличивается и время рабочего цикла машины. В связи с этим некоторые методические пособия рекомендуют принимать при расчетах коэффициент, учитывающий спаренную работу бульдозеров, $K_{\text{спар.р}} = 1,1$ (т.е. принимается увеличение производительности на 10 %). Следует также учитывать, что такой технологический прием требует не только присутствия двух и более одинаковых машин на строительной площадке, но и высокой квалификации, взаимопонимания машинистов.

Список литературы

1. Земляные работы в строительстве [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.earthwork.ru> (дата обращения: 10.10.2015).
2. Курилов Е.В., Трошин Д.И. Повышение эффективности бульдозерных отвалов // Строительные и дорожные машины. – 2014. – № 9. – С. 9–12.
3. Хмара Л.А., Холодов А.П. Повышение эффективности бульдозера путем использования гидропневмоаккумулирующей системы // Строительные и дорожные машины. – 2012. – № 3. – С. 33–37.
4. Ушакова В.Н., Цыганкова М.А. Технология производства, перемещения и укладки грунта: метод. указания к контрольной работе по дисциплине «Основы строительного производства» для студентов специальности 290100 «Архитектура» очной формы обучения / Тюмен. гос. арх.-строит. ун-т. – Тюмень, 2010. – 49 с.
5. Агапов А.Б., Густов Д.Ю., Янсон Р.А. Тяговый расчет бульдозера: учеб.-метод. указания / Моск. гос. строит. ун-т. – М., 2007.
6. Бочкарева Т.М. Определение объемов земляных работ: метод. пособие для студентов специальностей 2903, 2905 очной и заочной формы обучения. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2006. – 42 с.
7. Каталог компании «Складские технологии» [Электронный ресурс]. – URL: <http://instepcar.ru> (дата обращения: 11.10.2015).
8. Коншин В.М., Локшин Е.С., Сабуренков С.Е. Изучение конструкции и выбор бульдозеров для конкретных условий эксплуатации: метод. указания к лаб. и практ. работам. – М.: Изд-во Моск. авт.-дорож. ин-та, 2015. – 24 с.
9. Першин М.Н., Артюхина Г.И. Возведение земляного полотна автомобильных дорог: учеб. пособие / СПбГАСУ. – СПб., 2007.
10. Вахрушев С.И. Строительные машины (в вопросах и ответах): учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – 135 с.

11. ЕНиР. Сб. Е2. Земляные работы. Вып. 1. Механизированные и ручные земляные работы. – М.: Стройиздат, 1988. – 224 с

12. Кашеварова Г.Г., Пермякова Т.Б. Численные методы решения задач строительства на ЭВМ: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 298 с.

Получено 17.10.2016

Вахрушев Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное производство и геотехника», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: spstf@pstu.ac.ru.

Исакова Юлия Александровна – студентка, строительный факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: jullyis.95@mail.ru.