

УДК 625.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-484-499>

EDN: BDSSNW

Научная статья



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТИ НОЖА И НИЖНЕЙ ЧАСТИ ОТВАЛА БУЛЬДОЗЕРА НА ГРУНТ В НАЧАЛЕ ПРОХОДА

В. А. Николаев*Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия**Nikolaev53@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-7503-6612>*

АННОТАЦИЯ

Введение. Применение комплекса агрегатов непрерывного действия в строительстве автомобильных дорог позволит увеличить производительность труда, улучшить качество строительства автомобильных дорог. Поэтому целью проектирования является создание комплекса агрегатов для осуществления непрерывного строительства автомобильных дорог, преимущественно в автоматическом режиме. Для реализации этой цели на первом этапе правильным является сочетание теоретических расчётов параметров рабочих органов технических средств непрерывного действия и конструктивных разработок. Для удаления камней, кустов, деревьев с полосы отвода будущей дороги целесообразно использовать агрегаты с бульдозерным оборудованием. Хотя теоретические основы разработки грунта весьма подробно рассмотрены, но, основываясь на них, сложно выявить и сопоставить частные затраты энергии воздействия на грунт элементов технических средств. Поэтому необходим подробный анализ взаимодействия с грунтом элементов различных технических средств, в частности бульдозерного оборудования. Прежде чем рассматривать первичный псевдосдвиг грунта, следует рассчитать действующие силы и затраты энергии, необходимой для воздействия поверхности ножа и нижней части отвала бульдозера на грунт.

Методика исследования. Если заглубление ножа небольшое, поверхность ножа транспортирует грунт вверх, осуществляя вторичное смещение грунта после первичного псевдосдвига; поднятие грунта на высоту; преодоление силы инерции разрабатываемого грунта; ускорение грунта; преодоление силы трения грунта о поверхность. Разработана методика определения затрат энергии, необходимой для воздействия поверхности ножа и нижней части отвала бульдозера на грунт в начале прохода, учитывающая указанные составляющие.

Результаты. На основе данной методики определены затраты энергии: на смещение грунта после первичного сдвига, поднятие грунта на высоту, преодоление силы инерции разрабатываемого грунта, ускорение грунта, преодоление силы трения грунта о поверхность. Исходя из начальных условий выявлены общие затраты энергии, мощность, сила тяги. Получены результаты расчётов затрат энергии, необходимой для осуществления перемещения поверхности ножа и нижней части отвала, во время резания грунта при различном заглублении ножа. Построены зависимости параметров от заглубления ножа бульдозерного оборудования.

Заключение. Анализируя рисунки, можно заметить, что точка P приложения сосредоточенной нормальной реакции ножа и нижней части отвала, проходящая через центр масс O смещаемого грунта, с увеличением заглубления ножа бульдозера сдвигается вниз, переходя на лезвие ножа. Так, при заглублении ножа более чем на 200 мм точка P приложения сосредоточенной нормальной реакции ножа и нижней части отвала расположена вне лезвия ножа. Во время работы бульдозера этого может не произойти, если заглубление ножа происходит постепенно. По мере заглубления ножа бульдозера общие объёмные затраты энергии, необходимые для перемещения в грунте поверхности ножа и нижней части отвала, в начале прохода увеличиваются.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грунт, бульдозерное оборудование, нож, нижняя часть отвала, резание, анализ, затраты энергии.

Статья поступила в редакцию 08.04.2022; одобрена после рецензирования 29.05.2022; принята к публикации 27.07.2022.

© Николаев В. А., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Николаев В. А. Определение затрат энергии, необходимой для воздействия поверхности ножа и нижней части отвала бульдозера на грунт в начале прохода // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 4 (86). С. 484-499. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-484-499>

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-484-499>

EDN: BDSSNW

Original article

DETERMINATION OF THE ENERGY REQUIRED TO EXPOSE THE SURFACE OF THE KNIFE AND THE BOTTOM OF THE BULLDOZER BLADE TO THE GROUND AT THE BEGINNING OF THE PASS

Vladimir A. Nikolayev

Yaroslavl Technical University,

Yaroslavl, Russia

Nikolaev53@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-7503-6612>

ABSTRACT

Introduction. The use of a complex of continuous units in the construction of roads will increase labour productivity, improve the quality of road construction. Therefore, the purpose of the design is to create a complex of units for the continuous construction of roads, mainly in automatic mode. In the first stage, a combination of theoretical calculations of the parameters of the continuous technology tools and design developments is the right way to achieve this goal. To remove stones, bushes, trees from the right-of-way of the future road, it is advisable to use units with bulldozer equipment. Although the theoretical foundations of soil development are considered in great detail, but based on them it is difficult to identify and compare the partial energy costs of the impact on the soil of the elements of technical means. Therefore, a detailed analysis of the interaction with the soil of the elements of various technical means, in particular, bulldozer equipment, is necessary. Before considering the primary pseudo-shift of the soil, it is necessary to calculate the effective forces and energy costs necessary for the impact of the surface of the knife and the lower part of the bulldozer blade on the ground.

The method of research. If the depth of the knife is small, the surface of the knife transports the soil upwards, carrying out: secondary displacement of the soil after the primary pseudo-shift; raising the soil to a height; overcoming the force of inertia of the developed soil; acceleration of the soil; overcoming the force of friction of the soil on the surface. A method for determining the energy costs required for the impact of the surface of the knife and the lower part of the bulldozer blade to the ground at the beginning of the passage, taking into account these components, has been developed.

Results. On the basis of the developed methodology, energy costs have been determined: for the displacement of the soil after the primary shift, raising the soil to a height, overcoming the inertial force of the developed soil, accelerating the soil, overcoming the friction force of the soil on the surface. The total energy costs, power, traction force are revealed, based on the initial conditions. The results of calculations of the energy costs required to move the surface of the knife and the lower part of the blade, during the cutting of the soil with different depths of the knife, are obtained. The parameter dependencies on the depth of the knife of the bulldozer equipment are constructed.

Conclusion. Analysing the drawings, it can be seen that the P-point of application of the concentrated normal reaction of the knife and the lower part of the blade, passing through O mass center of the displaced soil, with an increase in the depth of the bulldozer knife, shifts down, passing to the knife blade. So, when the knife is buried by more than 200 mm, P point of application of the concentrated normal reaction of the knife and the lower part of the blade is located outside the blade of the knife. During the operation of the bulldozer, this may not happen if the knife is deepened gradually. As the bulldozer knife is deepened, the total volumetric energy required to move the surface of the knife and the lower part of the blade at the beginning of the passage increases in the ground.

KEYWORDS: soil, bulldozer equipment, knife, blade bottom, cutting, analysis, energy consumption.

© Nikolayev V. A., 2022



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

The article was submitted 08.04.2022; approved after reviewing 29.05.2022; accepted for publication 27.07.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Nikolayev V. A. Determination of the energy required to expose the surface of the knife and the bottom of the bulldozer blade to the ground at the beginning of the pass. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2022; 19 (4): 484-499. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-484-499>

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1) приведены этапы создания комплекса технических средств непрерывного строительства автодорог;

2) разработана методика определения затрат энергии, необходимой для воздействия поверхности ножа и нижней части отвала бульдозера на грунт в начале прохода;

3) приведён пример расчёта затрат энергии, необходимой для воздействия поверхности ножа и нижней части отвала бульдозера на грунт в начале прохода, исходя из начальных условий;

4) построены зависимости параметров от заглубления ножа бульдозерного оборудования.

ВВЕДЕНИЕ

Применение комплекса агрегатов непрерывного действия в строительстве автомобильных дорог позволит увеличить производительность труда, улучшить качество строительства автомобильных дорог. Поэтому целью проектирования является создание комплекса агрегатов для осуществления непрерывного строительства автомобильных дорог, преимущественно в автоматическом режиме. Для реализации этой цели на первом этапе правильным является сочетание теоретических расчётов параметров рабочих органов технических средств непрерывного действия и конструктивных разработок (рисунок 1).

Для удаления камней, кустов, деревьев с полосы отвода будущей дороги целесообразно использовать агрегаты с бульдозерным оборудованием. Хотя теоретические основы разработки грунта весьма подробно рассмотрены в [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25], но, основываясь на них, сложно выявить и сопоставить частные затраты энергии воздействия на грунт элементов технических средств. Поэтому необходим подробный анализ взаимодействия с грунтом элементов различных технических средств, в частности бульдозерного оборудования [26, 27].

Так как передний угол ножа больше угла трения грунта о сталь $\alpha > \varphi_{с-г}$ (рисунок 2, а), то резание грунта ножом близко к резанию пуансоном. Первичный сдвиг грунта должен бы происходить по поверхности, которой в продольно-вертикальной плоскости соответствует линия $АН$, отклоняющейся от нормали к передней поверхности ножа на угол трения грунта о сталь $\varphi_{с-г}$. Однако ввиду большой площади поверхности сдвига реального сдвига грунта не произойдёт. В пределах объёма, которому в продольно-вертикальной плоскости соответствует площадь $АНСВ$, грунт от воздействия ножа будет находиться в сложном напряжённом состоянии, сочетающем напряжения сдвига, объёмного сжатия и смятия. Поэтому предположим, что по поверхности, которой в продольно-вертикальной плоскости соответствует линия $АН$, произойдёт первичный псевдосдвиг. Допустим, что первичный псевдосдвиг грунта происходит дискретно, путём микросдвигов. Каждый микросдвиг грунта происходит на пути, которому соответствует на передней поверхности ножа расстояние AB микросдвига, $l_{мсд}$.

Усилие псевдосдвига зависит от многих факторов, в частности от давления, которое оказывает смещаемый грунт в пределах объёма, которому в продольно-вертикальной плоскости соответствует площадь $СВЕД$ (см. рисунок 2, а). Поэтому, прежде чем рассматривать первичный псевдосдвиг грунта, следует рассчитать действующие силы и затраты энергии, необходимой для воздействия поверхности ножа и нижней части отвала бульдозера на грунт в пределах объёма, которому в продольно-вертикальной плоскости соответствует площадь $СВЕД$.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Поверхность ножа и нижней части отвала транспортирует грунт вверх, осуществляя:

- вторичное смещение грунта после первичного псевдосдвига [27];
- поднятие грунта на высоту $h_{под}$ (см. рисунок 2, а);

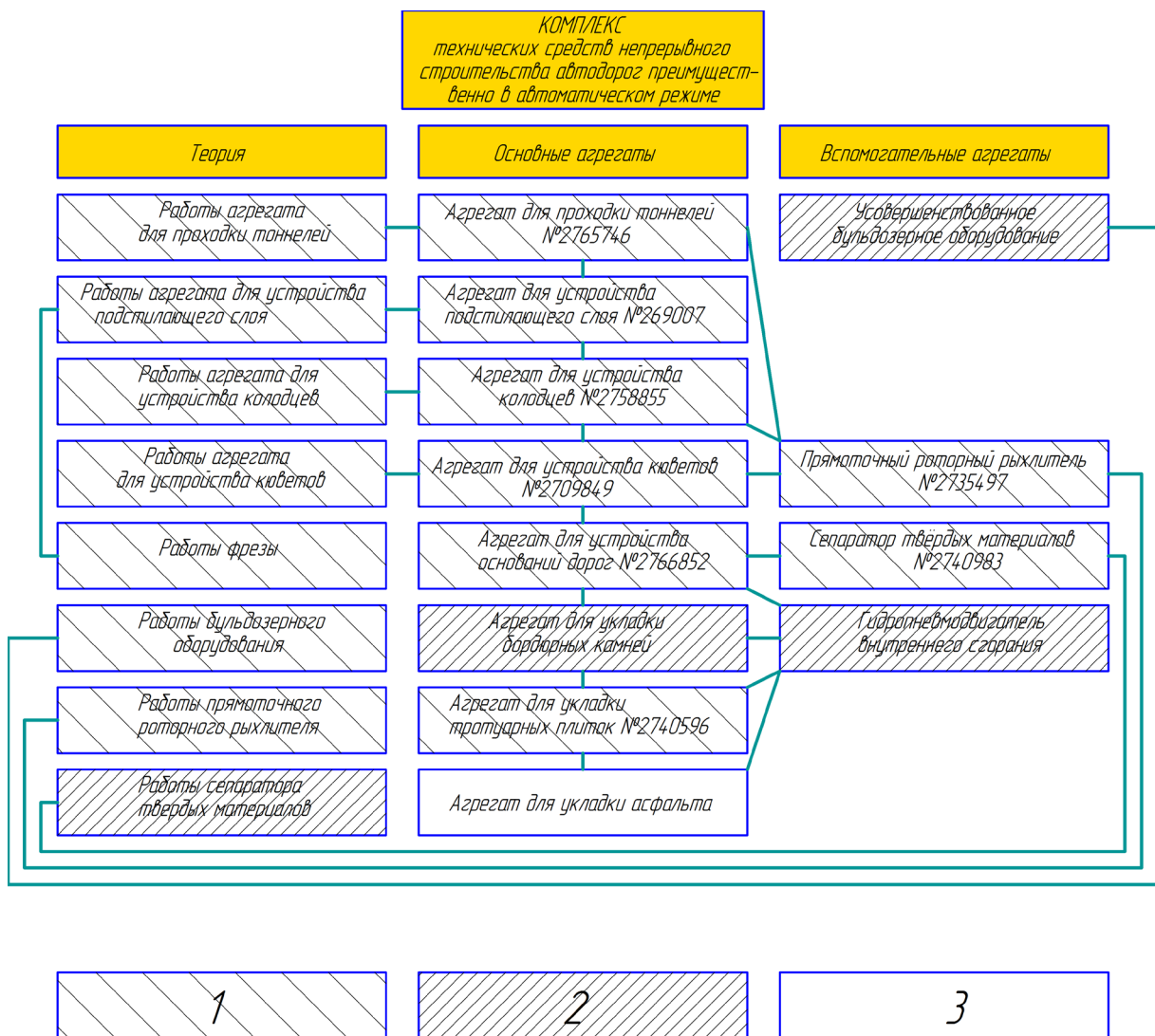


Рисунок 1 – Комплекс технических средств непрерывного строительства автодорог:
1 – разработано, запатентовано;
2 – в стадии разработки, патентования;
3 – следует разработать
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Complex of technical means of continuous roads construction:
1 – developed, patented;
2 – under development, patenting;
3 – should be developed
Source: compiled by the author.

- преодоление силы инерции разрабатываемого грунта;
 - ускорение грунта;
 - преодоление силы трения грунта о поверхность.
- Объём грунта, воздействующего на поверхность ножа и нижнюю часть отвала в секунду,

$$\frac{V_{н+н.ч.о}}{\tau} = a \cdot B \cdot v_a, \tag{1}$$

где a – глубина хода ножа; B – ширина отвала; v_a – скорость агрегата.

Хотя мгновенное значение силы, необходимой для смещения грунта после первичного псевдосдвига, изменяется в широких пределах, среднее её значение

$$F_{\text{CM}} = \sigma_{\text{CM}}^{\text{B}} S_{\text{CM}}, \quad (2)$$

$$u_{\text{CM}} = F_{\text{CM}} s \cos \psi_{\text{B}}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{см}}^B$ – среднее напряжение в грунте в период его смещения.

Общую площадь $S_{\text{см}}$ смещения первично сдвинутого грунта возьмём из [27]. Затраты энергии на смещение первично сдвинутого грунта поверхностью ножа и нижней части отвала определим из выражения

где s – путь бульдозера, необходимый для разработки одного кубического метра грунта; $\psi_{\text{в}}$ – угол наклона равнодействующей силы к горизонтали (см. рисунок 2, а). Точка О приложения силы $F_{\text{см}}$ в центре масс смещаемого грунта.

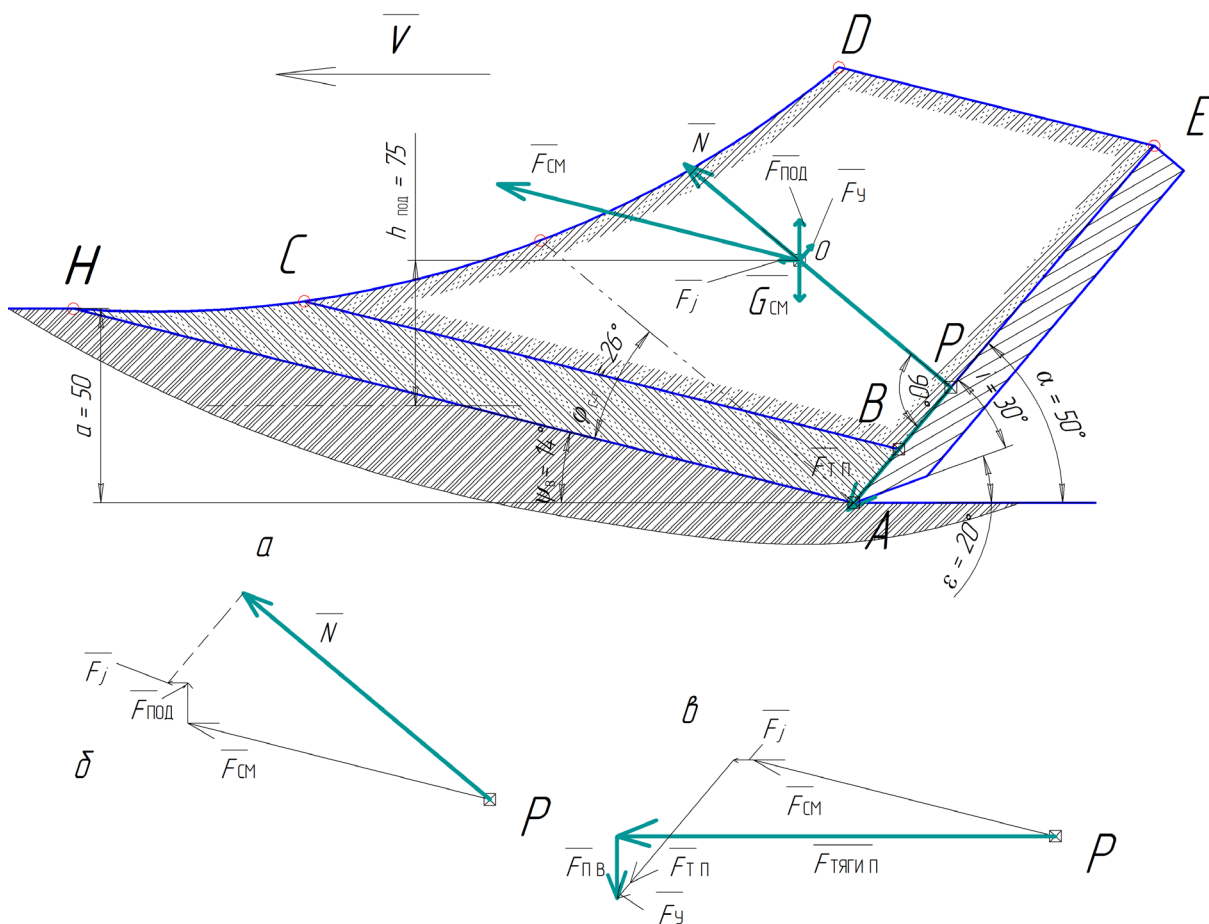


Рисунок 2 – Динамика воздействия поверхности ножа и нижней части отвала бульдозера на грунт:
 а – схема сил, приложенных к участку смещаемого грунта;
 б – схема определения нормальной реакции поверхности ножа
 и нижней части отвала на воздействие смещаемого грунта;
 в – схема определения силы тяги
 Источник: составлено автором.

Figure 2 – Dynamics of the impact for the surface of the knife and the lower part of the bulldozer blade to the ground:
a – a diagram of the forces applied to the site of the displaced soil;
b – a scheme for determining the normal reaction of the surface of the knife and the lower part of the blade to the effect of the displaced soil;
c – scheme for determining the thrust force
 Source: compiled by the author.

Допустим, одновременно весь первично разрыхлённый грунт, сосредоточенный в объёме один кубический метр, массой $m_{\text{пр}}$, поверхность ножа и нижняя часть отвала поднимает на условную высоту $h_{\text{под}}$ (см. рисунок 2, а). Потенциальная энергия, затрачиваемая на этот подъём,

$$u_{\text{под}} = g m_{\text{пр}} h_{\text{под}}. \quad (4)$$

Масса одного кубического метра первично разрыхлённого грунта

$$m_{\text{пр}} = \rho_{\text{пр}} V_{\text{пр}}.$$

Плотность первично сдвинутого и разрыхлённого грунта

$$\rho_{\text{пр}} = \frac{\rho}{k_{\text{р}}},$$

где $k_{\text{р}}$ – коэффициент, учитывающий разрыхление грунта; $V_{\text{пр}} = 1 \text{ м}^3$ – объём грунта.

Среднее значение силы, необходимой для подъёма смещаемого грунта, равно силе его тяжести:

$$F_{\text{под}} = G_{\text{см}} = g m,$$

где масса грунта, воздействующего на нож и нижнюю часть отвала,

$$m = \rho_{\text{пр}} V = \rho_{\text{пр}} S_{\text{см}} B. \quad (5)$$

Исходя из принципа независимости сил, допустим, что не бульдозер перемещается относительно грунта, а грунт с горизонтальной скоростью агрегата перемещается относительно ножа и нижней части отвала бульдозера. Сила инерции грунта воздействует на нож и нижнюю часть отвала бульдозера, вызывая их ответную реакцию F_j (см. рисунок 2, а). Величина этой реакции в каждый момент времени изменяется. Поэтому допустим, что первично псевдосдвинутый грунт объёмом один кубический метр одновременно тормозится поверхностью ножа и нижней частью отвала. Тогда условная сила, противодействующая инерции грунта,

$$F_{\Sigma j} = a_j m_{\text{пр}}, \quad (6)$$

где a_j – отрицательное ускорение (замедление) грунта поверхностью ножа и нижней частью отвала.

С достаточной степенью точности можно принять время замедления фрагмента грунта равным времени микросдвига. Расстояние микросдвига $l_{\text{мсд}}$. Скорость агрегата v_a . Время замедления грунта

$$\tau_j \approx \frac{l_{\text{мсд}} \cos \alpha}{v_a \cos \alpha} = \frac{l_{\text{мсд}}}{v_a}. \quad (7)$$

Примем конечную горизонтальную скорость грунта после его замедления $v_{\text{кон г}} = 0$.

Замедление грунта

$$a_j = \frac{v_{\text{кон г}} - v_a}{\tau_j} = \frac{0 - v_a}{\tau_j}. \quad (8)$$

Среднее мгновенное значение силы определим из пропорции

$$F_j = F_{\Sigma j} \frac{l_{\text{мсд}}}{s}. \quad (9)$$

Энергия на преодоление напора грунта объёмом один кубический метр на переднюю поверхность ножа и нижней части отвала

$$u_j = F_j \cdot s \text{ или } u_j = F_{\Sigma j} l_{\text{мсд}}. \quad (10)$$

Грунт – упруговязкопластичная среда. Его вязкопластичные свойства учитываем при расчёте смещения грунта. Упругие свойства грунта зависят от содержания глины, песка и других составляющих, его влажности. Поэтому расчёт ускорения грунта после его встречи с ножом и нижней частью отвала должен быть основан на экспериментальных данных. Кроме того, грунт состоит из отдельных частиц, расположенных в пласте. С поверхностью ножа и нижней части отвала контактируют только частицы грунта, расположенные внизу отделённого пласта. Остальные частицы в пласте непосредственно с ножом и нижней частью отвала не взаимодействуют. Они получают ускорение от частиц грунта, которые взаимодействуют с ножом и нижней частью отвала. Величина и направление вектора ускорения каждой частицы грунта является случайными. Грунт поступает на нож и нижнюю часть отвала непрерывно. Поле векторов частиц грунта меняется в каждый момент времени, то есть поле векторов частиц грунта является случайной величиной как в пространстве, так и во времени.

Чтобы рассчитать ускорение грунта от воздействия ножа и нижней части отвала, представим, что сечение грунта объёмом один кубический метр соответствует сечению BCDE (см. рисунок 2, а). При этом грунт объёмом один кубический метр представляет монолит. Этот монолит, обладая упругими свойствами, ударяясь о нож и нижнюю часть отвала, получает ускорение. Направление частных векторов ускорения частиц грунта может быть различным и зависит от многих факторов. Однако преимущественным общим является направление ускорения грунта параллельно поверх-

ности ножа. Направим вектор силы ускорения грунта F_y параллельно поверхности ножа. Закругление нижней части отвала не учитываем.

Допустим, после его горизонтального замедления до $v_{\text{кон } \Gamma} = 0$, грунт в момент касания ножа и нижней части отвала имеет начальную скорость параллельно поверхности ножа $v_{\text{нач } y} = 0$. Предположим, конечная скорость грунта от воздействия ножа и нижней части отвала равна скорости агрегата, $v_{\text{кон } y} = v_a$. Примем время ускорения

$$\tau_{\text{пн}} \approx \tau_j = \frac{l_{\text{мсд}}}{v_a}. \quad (11)$$

Тогда ускорение грунта

$$a_y = \frac{v_{\text{кон } y} - v_{\text{нач } y}}{\tau_y} = \frac{v_{\text{кон } y}}{\tau_y}. \quad (12)$$

Сила, необходимая для придания грунту ускорения,

$$F_{\Sigma y} = a_y m_{\text{пн}}. \quad (13)$$

Аналогично (9) среднее мгновенное значение силы определим из пропорции

$$F_y = F_{\Sigma y} \frac{l_{\text{мсд}}}{s}. \quad (14)$$

Энергия на придание ускорения грунту объёмом один кубический метр передней поверхностью ножа и нижней частью отвала

$$u_y = F_y \cdot s \text{ или } u_y = F_{\Sigma y} l_{\text{мсд}}. \quad (15)$$

При движении пласт грунта преодолевает силу $F_{\text{тп}}$ трения грунта о поверхность ножа и нижней части отвала. Нанеся все силы и спроецировав их на направление, перпендикулярное поверхности ножа и нижней части отвала (рисунок 2, б), получим общую нормальную реакцию $N_{\text{см}}$ этой поверхности. Сила трения грунта о поверхность ножа и нижней части отвала

$$F_{\text{тп}} = f_{\text{с-г}} N_{\text{см}}. \quad (16)$$

Сосредоточенная сила трения направлена под углом α к направлению движения бульдозера и приложена к точке P . Составляющая силы трения $F_{\text{тп}} \sin \alpha$ воздействует на элементы конструкции бульдозера, создавая в них дополнительные напряжения. Составляющая силы трения $F_{\text{тп}} \cos \alpha$ препятствует движению агрегата. Поэтому затраты энергии на преодоление силы трения о поверхность ножа и нижней части отвала грунта объёмом один кубический метр:

$$u_{\text{тп}} = F_{\text{тп}} s \cos \alpha. \quad (17)$$

Общие затраты энергии на перемещение поверхности ножа и нижней части отвала в грунте объёмом один кубический метр равны сумме частных объёмных затрат энергии:

$$u_{\Sigma \text{п}} = u_{\text{см}} + u_{\text{под}} + u_j + u_y + u_{\text{тп}}. \quad (18)$$

Путь s , необходимый для разработки одного кубического метра грунта, бульдозер пройдёт за время

$$\tau = \frac{s}{v_a}. \quad (19)$$

Мощность, затрачиваемая трактором на перемещение поверхности ножа и нижней части отвала,

$$N_{\text{п}} = \frac{u_{\Sigma \text{п}}}{\tau}. \quad (20)$$

Силу $F_{\text{тяги п}}$ тяги трактора для смещения грунта поверхностью ножа и нижней части отвала бульдозера определим, сложив и спроецировав полученные силы на горизонталь (рисунок 2, в).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для расчёта примем следующие исходные данные. Грунт – суглинки плотностью $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$. Движение агрегата со скоростью $v_a = 1 \text{ м/с}$. Ширина отвала $B = 2,5 \text{ м}$. Глубина разработки $a = 0,05 \text{ м}$. Приняты допущения:

- предел прочности грунта на смещение после первичного псевдосдвига лезвием ножа бульдозера при полузажатом резании $\sigma_{\text{см}}^B = 0,2 \text{ МПа}$;
- коэффициент, учитывающий разрыхление грунта, $k_p = 1,5$;
- коэффициент трения грунта о сталь $f_{\text{с-г}} = 0,5$;
- расстояние микросдвига $l_{\text{мсд}} = 18 \text{ мм}$.

а) *Затраты энергии на смещение грунта после первичного сдвига*

Объём грунта, воздействующего на поверхность ножа и нижнюю часть отвала в секунду (1),

$$\frac{V_{\text{н+нч о}}}{\tau} = 0,05 \cdot 2,5 \cdot 1 = 0,125 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Если глубина разработки грунта бульдозером $a = 50 \text{ мм}$, площадь сечения грунта, смещаемого после первичного псевдосдвига лезвием ножа, $S_{\text{см}} = 10004 \text{ мм}^2$ [27]. Сила, необходимая для смещения первично сдвинутого грунта ножом и нижней частью отвала бульдозера (2),

$$F_{\text{см}} = 0,2 \cdot 10004 = 2000 \text{ Н}.$$

Путь бульдозера, необходимый для разра-
ботки одного кубического метра грунта,

$$s = \frac{V}{Ba} = \frac{1}{2,5 \cdot 0,05} = 8 \text{ м.}$$

Затраты энергии на смещение первично
сдвинутого грунта поверхностью ножа и ниж-
ней части отвала (3).

$$u_{см} = 2000 \cdot 8 \cdot \cos 14^\circ = 15530 \text{ Дж/м}^3.$$

*б) Энергия, затрачиваемая на подъём сме-
щаемого грунта*

Плотность первично сдвинутого и разрых-
лённого грунта

$$\rho_{п р} = \frac{1600}{1,5} = 1067 \text{ кг/м}^3.$$

Масса одного кубического метра первично
разрыхлённого грунта $m_{п р} = 1067 \text{ кг}$.

Средняя масса грунта, воздействующего на
нож и нижнюю часть отвала (5),

$$m = 1067 \cdot 10004 \cdot 10^{-6} \cdot 2,5 = 26,7 \text{ кг.}$$

Сила, необходимая для подъёма смещае-
мого грунта, равна силе его тяжести

$$F_{под} = G_{см} = 9,8 \cdot 26,7 = 261 \text{ Н.}$$

Из рисунка 2, а высота подъёма грунта
от воздействия ножа и нижней части отвала
 $h_{под} = 0,075 \text{ м}$. Объёмная энергия, затрачивае-
мая на подъём смещаемого грунта (4),

$$u_{под} = 9,8 \cdot 1067 \cdot 0,075 = 784 \text{ Дж/м}^3.$$

*в) Энергия на преодоление напора грунта
объёмом один кубический метр на переднюю
поверхность ножа и нижней части отвала*

Время замедления грунта при столкнове-
нии с поверхностью ножа и нижней части от-
вала (7):

$$\tau_j = \frac{0,018}{1} = 0,018 \text{ с.}$$

Замедление грунта (8):

$$a_j = \frac{1}{0,018} = 55,5 \text{ м/с}^2.$$

Условная сила, противодействующая инер-
ции грунта (6),

$$F_{\Sigma j} = 55,5 \cdot 1067 = 59278 \text{ Н/м}^3.$$

Среднее мгновенное значение силы опре-
делим из пропорции (9):

$$F_j = 59278 \frac{0,018}{8} = 133 \text{ Н.}$$

Энергия на преодоление напора грунта
объёмом один кубический метр на переднюю
поверхность ножа и нижней части отвала (10):

$$u_j = 59278 \cdot 0,018 = 1067 \text{ Дж/м}^3.$$

г) Энергия на придание ускорения грунту

Конечная скорость грунта от воздействия
ножа и нижней части отвала $v_{кон у} = v_a = 1 \text{ м/с}$.
Время ускорения грунта (11):

$$\tau_{п н} \approx \tau_j = 0,018 \text{ с.}$$

Ускорение грунта (12):

$$a_y = \frac{1}{0,018} = 55,5 \text{ м/с}^2.$$

Условная сила, необходимая для придания
грунту ускорения, (13):

$$F_{\Sigma y} = 55,5 \cdot 1067 = 59278 \text{ Н/м}^3.$$

Среднее мгновенное значение силы опре-
делим из пропорции (14):

$$F_y = 59278 \frac{0,018}{8} = 133 \text{ Н.}$$

Энергия на придание ускорения грунту,
объёмом один кубический метр, передней по-
верхностью ножа и нижней частью отвала (15)

$$u_y = 59278 \cdot 0,018 = 1067 \text{ Дж/м}^3.$$

*д) Затраты энергии на преодоление тре-
ния грунта о поверхность ножа и нижней ча-
сти отвала*

Нанесём все силы на рисунок 2, б в приня-
том масштабе, приложив их к точке Р. Спрое-
цируем силы на направление, перпендикуляр-
ное поверхности ножа и нижней части отвала.
Сила F_y направлена параллельно поверхности
ножа, поэтому не влияет на нормальную реак-
цию. Из рисунка нормальная реакция поверх-
ности ножа $N = 2067 \text{ Н}$.

Сила трения грунта о поверхность ножа и
нижней части отвала (16):

$$F_{т н} = 0,5 \cdot 2067 = 1033 \text{ Н.}$$

Объёмные затраты энергии на преодоле-
ние трения грунта о поверхность ножа и ниж-
ней части отвала грунта (17):

$$u_{т н} = 1033 \cdot 8 \cdot \cos 50^\circ = 5315 \text{ Дж/м}^3.$$

*е) Общие затраты энергии, мощность,
сила тяги*

Общие объёмные затраты энергии на пе-
ремещение поверхности ножа и нижней части
отвала равны сумме частных объёмных за-
трат энергии (18):

$$u_{\Sigma \Pi} = 15530 + 784 + 1067 + 1067 + 5315 = 23763 \text{ Дж/м}^3 \approx 23,8 \text{ кДж/м}^3.$$

Путь s , необходимый для разработки одного кубического метра грунта, бульдозер пройдёт за время (19):

$$\tau = \frac{8}{1} = 8 \text{ с.}$$

Мощность, затрачиваемая трактором на перемещение поверхности ножа и нижней части отвала (20),

$$N_{\Pi} = \frac{23763}{8} = 2970 \text{ Вт} \approx 3,0 \text{ кВт.}$$

Сложим последовательно силы $F_{\text{см}}$, F_j , F_y и $F_{\text{тп}}$ (рисунок 2, в), причём силу F_y направим в противоположную сторону. Спроецировав сложенные силы на горизонталь, получим силу

тяги трактора, необходимую для перемещения поверхности ножа и нижней части отвала, $F_{\text{тяги п}} = 2816 \text{ Н} \approx 2,8 \text{ кН}$.

Вертикальная сила $F_{\text{пв}} = 400 \text{ Н}$ направлена вниз. К ней следует добавить силу $G_{\text{см}} = 261 \text{ Н}$ тяжести смещаемого грунта. Суммарная вертикальная сила

$$F_{\Sigma \text{ пв}} = F_{\text{пв}} + G_{\text{см}}; F_{\Sigma \text{ пв}} = 400 + 261 = 661 \text{ Н.}$$

Равная сумме этих сил вертикальная сила воздействия ножа и нижней части отвала на смещаемый грунт направлена вверх. Структура затрат энергии на перемещение поверхности ножа и нижней части отвала в грунте объёмом один кубический метр на рисунке 3.

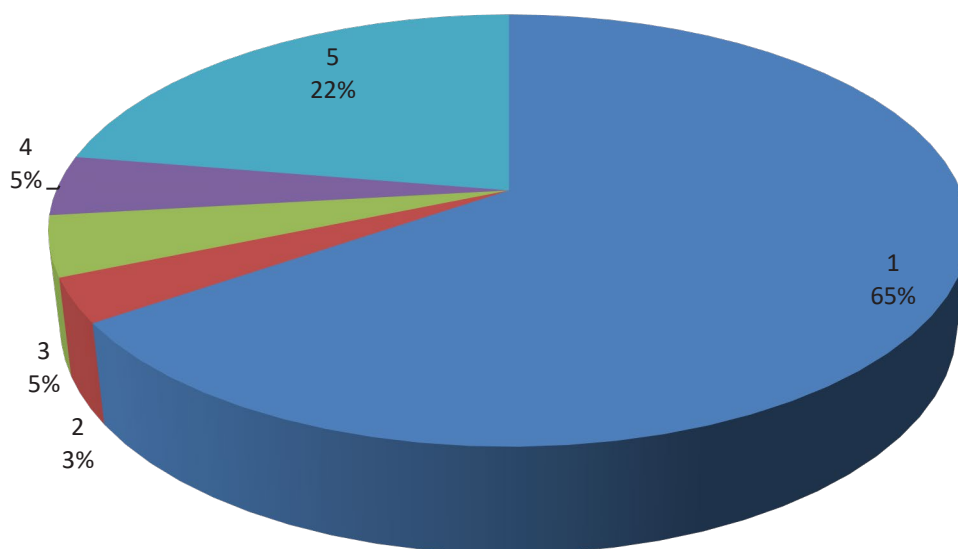


Рисунок 3 – Структура затрат энергии, необходимой для осуществления перемещения поверхности ножа и нижней части отвала, во время резания грунта при заглублении ножа 50 мм в начале прохода бульдозера:
 1 – энергия на смещение грунта; 2 – энергия на подъём грунта;
 3 – энергия на замедление грунта; 4 – энергия на ускорение грунта;
 5 – энергия на преодоление трения ножа и нижней части отвала о грунт
 Источник: составлено автором.

Figure 3 – The structure of the energy required to move the surface of the knife and the lower part of the blade, during the cutting of the soil when the knife is buried 50 mm at the beginning of the bulldozer pass:
 1 – energy for the displacement of the soil; 2 – energy for soil lifting;
 3 – energy to slow down the soil; 4 – energy for soil acceleration;
 5 – energy to overcome the friction of the knife and the bottom of the blade to the ground
 Source: compiled by the author.

Результаты расчётов затрат энергии, необходимой для осуществления перемещения поверхности ножа и нижней части отвала, во время резания грунта при различном заглублении ножа сведены в таблицы 1, 2, 3, 4.

Затраты энергии на подъём грунта поверхностью ножа и нижней частью отвала в начале прохода, при заглублении ножа на 50 мм, больше, чем при заглублении на 100 мм, так

как при заглублении ножа на 50 мм была условно взята высота подъёма грунта, равная высоте верхней кромки ножа.

Затраты энергии на преодоление напора грунта объёмом один кубический метр на переднюю поверхность ножа и нижней части отвала и энергии на придание ускорения грунту остаются неизменными с увеличением заглубления ножа бульдозера.

Таблица 1

Затраты энергии на смещение грунта поверхностью ножа и нижней частью отвала в начале прохода при различном заглублении ножа
Источник: составлено автором.

Table 1

Energy consumption for soil displacement by knife surface and the bottom of the dump at the beginning of the pass with different deepening of the knife
Source: compiled by the author.

Глубина, а	Объём грунта в секунду	Напряжение при смещении грунта	Площадь смещения	Сила, необходимая для смещения грунта	Путь бульдозера, необходимый для разработки одного кубического метра грунта, s	Объёмные затраты энергии
м	куб. м/с	МПа	кв. мм	Н	м	Дж/куб. м
0,05	0,125	0,2	10004	2000	8	15530
0,1	0,25	0,2	25894	5179	4	20100
0,15	0,375	0,2	60796	12159	2,67	31461
0,2	0,5	0,2	111323	22265	2	43206
0,25	0,625	0,2	175980	35196	1,6	54640
0,3	0,75	0,2	253877	50775	1,33	65688

Таблица 2

Затраты энергии на подъём грунта поверхностью ножа и нижней частью отвала в начале прохода при различном заглублении ножа
Источник: составлено автором.

Table 2

Energy consumption for soil lifting by knife surface and the bottom of the dump at the beginning of the pass in case of different deepening of the knife
Source: compiled by the author.

Глубина, а	Масса одного кубического метра грунта	Масса грунта, действующего на нож и нижнюю часть отвала	Сила тяжести грунта, действующего на нож и нижнюю часть отвала	Сила, необходимая для подъёма грунта	Высота подъёма грунта	Объёмные затраты энергии на подъём грунта
м	кг	кг	Н	Н	м	Дж/куб. м
0,05	1067	26,7	261	261	0,075	784
0,1	1067	69,05	677	677	0,031	324
0,15	1067	162	1589	1589	0,046	481
0,2	1067	297	2909	2909	0,059	617
0,25	1067	469	4599	4599	0,072	753
0,3	1067	677	6635	6635	0,084	878

Таблица 3

**Затраты энергии на преодоление трения грунта
о поверхность ножа и нижней части отвала
в начале прохода при различном заглублении ножа и общие затраты энергии**
Источник: составлено автором.

Table 3

**Energy consumption for overcoming soil friction against the knife surface
and the lower part of the dump at the beginning of the pass with different deepening
of the knife and total energy costs**
Source: compiled by the author.

Глубина, а	Нормальная реакция ножа и нижней части отвала	Коэффициент трения грунта о сталь	Сила трения грунта о нож и нижнюю часть отвала	Объёмная энергия на преодоление трения грунта о нож и нижнюю часть отвала	Общие затраты энергии
м	Н		Н	Дж/куб. м	Дж/куб. м
0,05	2067	0,5	1033	5315	23763
0,1	5293	0,5	2646	6804	29361
0,15	12257	0,5	6128	10505	44580
0,2	22223	0,5	11112	14285	61408
0,25	35361	0,5	17680	18184	77272
0,3	50427	0,5	25213	21609	92124

Таблица 4

**Мощность и сила тяги трактора, необходимая для перемещения поверхности ножа
и нижней части отвала в начале прохода при различном заглублении ножа**
Источник: составлено автором.

Table 4

**Tractor traction power and force required to move knife surface
and the lower part of the dump at the beginning of the pass with different deepening of the knife**
Source: compiled by the author.

Глубина, а	Время разработки одного кубического метра грунта	Мощность, необходимая для работы поверхности ножа и нижней части отвала бульдозера	Мощность	Сила тяги	Сила тяги трактора
м	с	Вт	кВт	Н	кН
0,05	8	2970	3	2816	2,8
0,1	4	7340	7,3	7175	7,2
0,15	2,67	16717	16,7	16383	16,4
0,2	2	30704	30,7	29522	29,5
0,25	1,6	48295	48,3	46678	46,7
0,3	1,33	69093	69,1	66530	66,5

В связи с увеличением затрат энергии на смещение грунта поверхностью ножа и нижней частью отвала и на преодоление трения грунта о поверхность ножа и нижней части отвала с увеличением заглубления ножа бульдозера

относительная доля затрат энергии на преодоление напора грунта и на придание ускорения грунту уменьшается. Зависимости параметров от заглубления ножа даны на рисунках 4, 5, 6, 7, 8, 9.

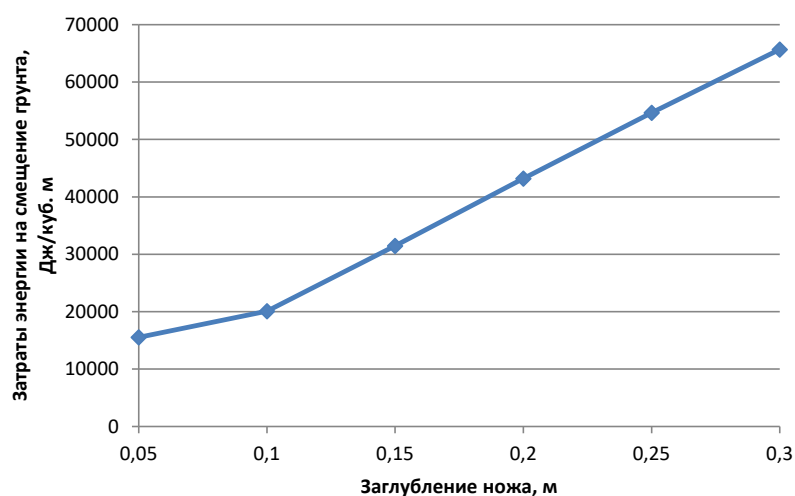


Рисунок 4 – Зависимость объёмных затрат энергии на смещение грунта поверхностью ножа и нижней частью отвала в начале прохода от заглубления ножа
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Dependence of volumetric energy expenditure on the displacement of the soil by the surface of the knife and the lower part of the blade at the beginning of the pass from the deepening of the knife
Source: compiled by the author.

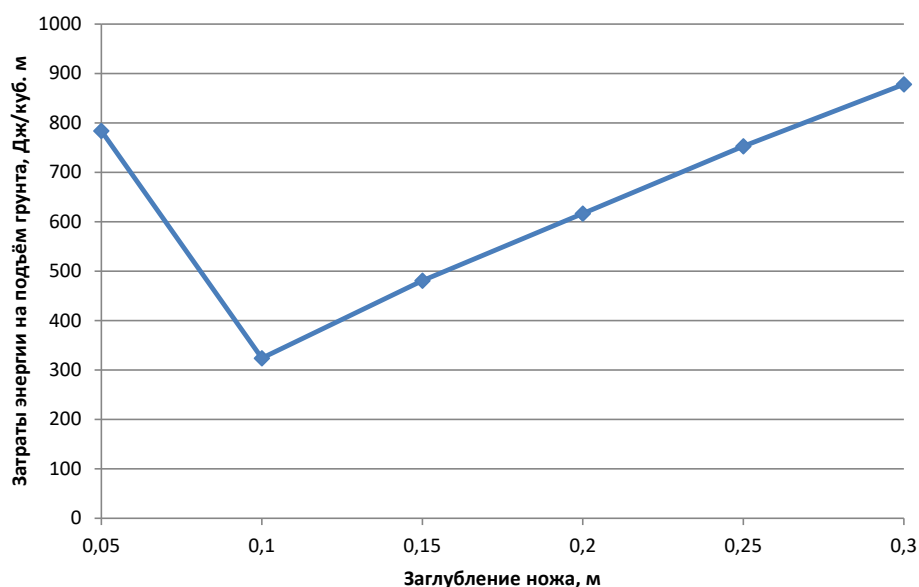


Рисунок 5 – Зависимость объёмных затрат энергии на подъём грунта поверхностью ножа и нижней частью отвала в начале прохода от заглубления ножа
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Dependence of volumetric energy expenditure on lifting the soil by the surface of the knife and the lower part of the blade at the beginning of the pass from the depth of the knife
Source: compiled by the author.

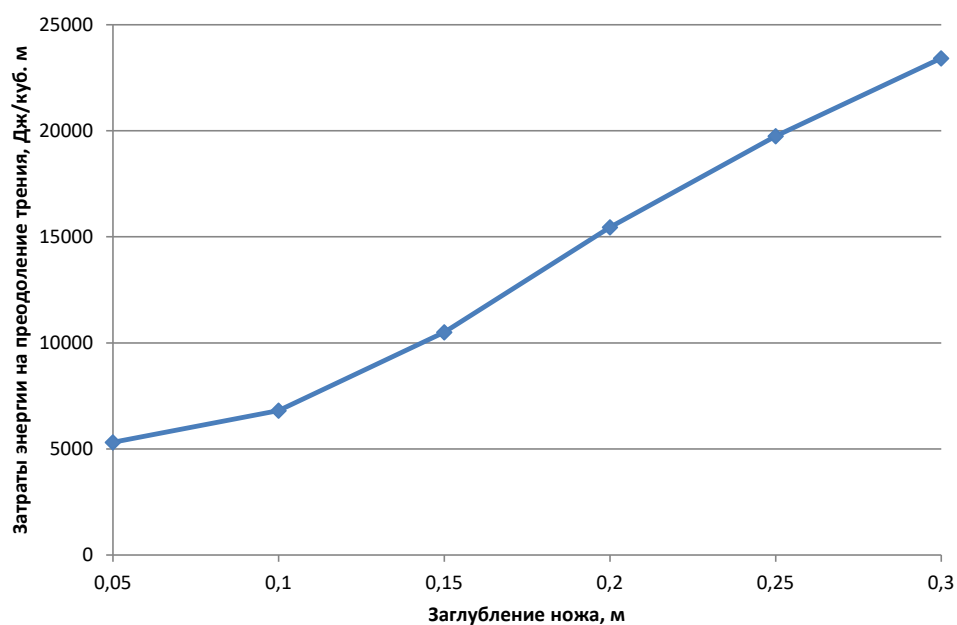


Рисунок 6 – Зависимость объёмных затрат энергии на преодоление трения грунта о поверхность ножа и нижней части отвала в начале прохода от заглубления ножа
Источник: составлено автором.

Figure 6 – Dependence of volumetric energy costs to overcome the friction of the soil on the surface of the knife and the lower part of the blade at the beginning of the pass from the depth of the knife
Source: compiled by the author.

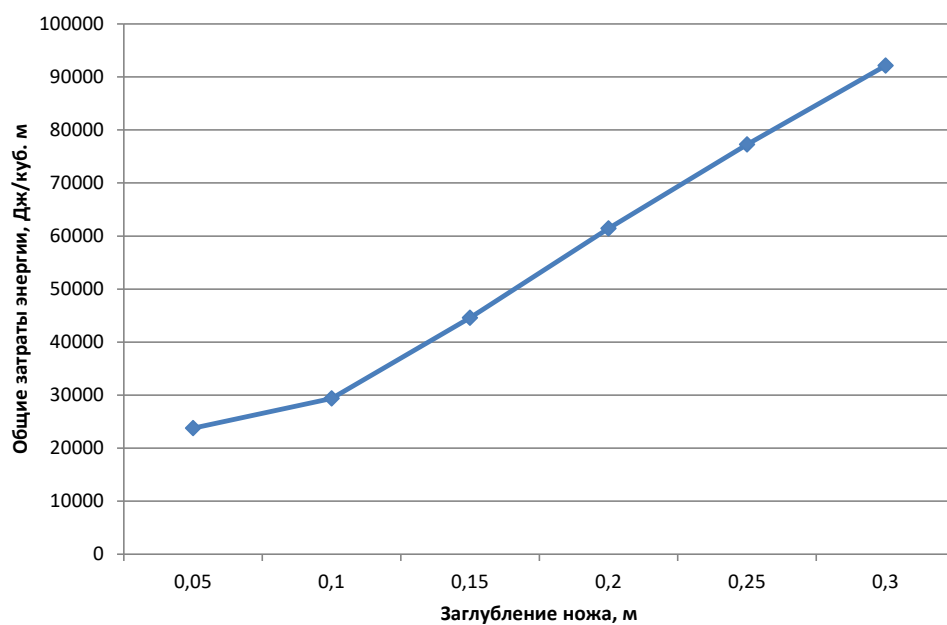


Рисунок 7 – Зависимость общих объёмных затрат энергии на перемещение поверхности ножа и нижней части отвала в начале прохода от заглубления ножа
Источник: составлено автором.

Figure 7 – The dependence of the total volumetric energy expenditure on moving the surface of the knife and the lower part of the blade at the beginning of the pass from the depth of the knife
Source: compiled by the author.

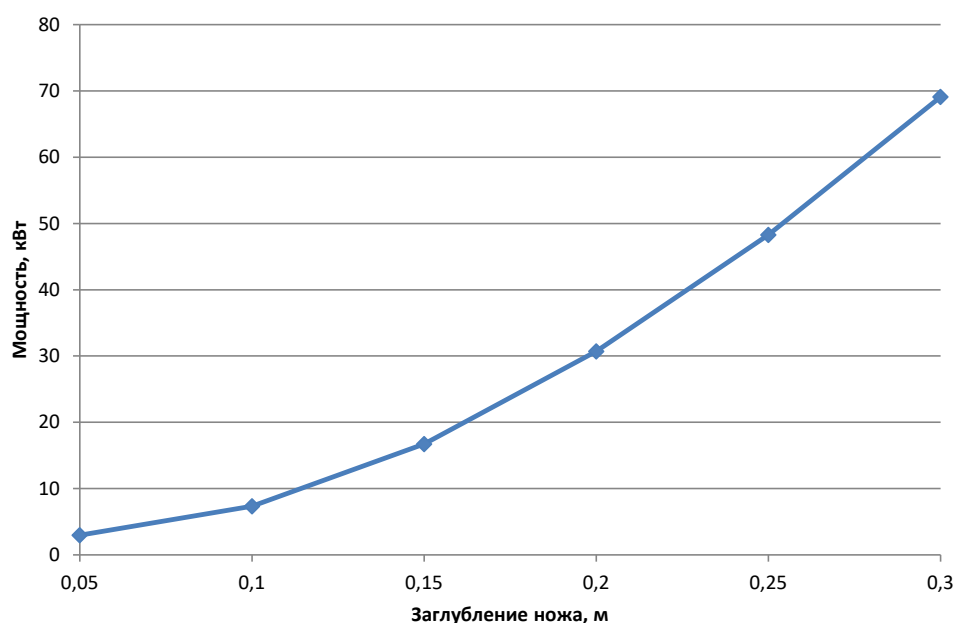


Рисунок 8 – Зависимость мощности, необходимой для перемещения поверхности ножа и нижней части отвала в начале прохода, от заглубления ножа
Источник: составлено автором.

Figure 8 – The dependence of the power required to move the surface of the knife and the lower part of the blade at the beginning of the pass, on the depth of the knife
Source: compiled by the author.

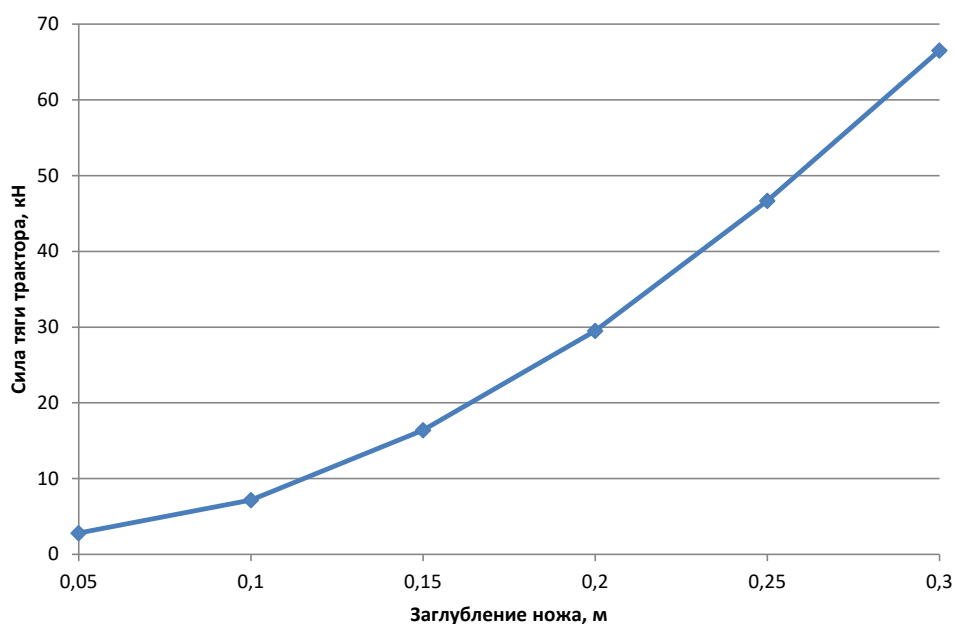


Рисунок 9 – Зависимость силы тяги трактора для преодоления сопротивления грунта перемещению поверхности ножа и нижней части отвала в начале прохода от заглубления ножа
Источник: составлено автором.

Figure 9 – Dependence of the tractor traction force to overcome the resistance of the soil to the movement of the knife surface and the lower part of the blade at the beginning of the pass from the sinking of the knife
Source: compiled by the author.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя рисунки, можно заметить, что точка Р приложения сосредоточенной нормальной реакции ножа и нижней части отвала, проходящая через центр масс О смещаемого грунта, с увеличением заглубления ножа бульдозера сдвигается вниз, переходя на лезвие ножа. Так, при заглублении ножа более чем на 200 мм, точка Р приложения сосредоточенной нормальной реакции ножа и нижней части отвала расположена вне лезвия ножа. Во время работы бульдозера этого может не произойти, если заглубление ножа происходит постепенно. По мере заглубления ножа бульдозера общие объёмные затраты энергии, необходимые для перемещения в грунте поверхности ножа и нижней части отвала, в начале прохода увеличиваются.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зыков Б. И. Теория рабочих процессов строительных машин. Ярославль: Изд. ЯГТУ, 2003. 114 с.
2. Жук А. Ф. Теоретическое обоснование рациональной технологической схемы и параметров ротационного плуга. Сборник научных трудов «Теория и расчёт почвообрабатывающих машин». Т. 120. М.: Машиностроение, 1989. С. 145–153.
3. Попов Г. Ф. Рабочие органы фрез. М.: Материалы НТС ВИСХОМ. Вып. 27. ОНТИ ВИСХОМ, 1970. С. 490–497.
4. Карасёв Г. Н. Определение силы резания грунта с учётом упругих деформаций при разрушении // Строительные и дорожные машины. 2008. № 4. С. 36–42.
5. Карнаухов А. И., Орловский С. Н. Определение затрат удельной энергии на процесс резания лесных почв торцевыми фрезами // Строительные и дорожные машины. 2010. № 1. С. 20–22.
6. Кравец И. М. Определение критической глубины резания при комбинированном резании грунтов гидрофрезой // Строительные и дорожные машины. 2010. № 5. С. 47–49.
7. Кириллов Ф. Ф. Детерминированная математическая модель временного распределения тягового усилия для многолезцовых рабочих органов землеройных машин // Строительные и дорожные машины. 2010. № 11. С. 44–48.
8. Берестов Е. И. Влияние трения грунта по поверхности ножа на сопротивление резанию // Строительные и дорожные машины. 2010. № 11. С. 34–38.
9. Вершинин А. В., Зубов В. С., Тюльнев А. М. Повышение эффективности дискофрезерных рабочих механизмов для разработки мёрзлых грунтов // Строительные и дорожные машины. 2012. № 8. С. 42–44.
10. Баловнев В. И., Нгуен З. Ш. Определение сопротивлений при разработке грунтов рыхлителем по интегральному показателю прочности // Строительные и дорожные машины. 2005. № 3. С. 38–40.
11. Ryabets N., Kurzner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy. // Cold Regions Science and Technology. 2003. Vol. 36. P. 115–128.

12. Liu X., Liu P. Experimental research on the compressive fracture toughness of wing fracture of frozen soil. // Cold Regions Science and Technology. 2011. Vol. 65. P. 421–428.

13. Talalay P.G. Subglacial till and Bedrock drilling // Cold Regions Science and Technology. 2013. Vol. 86. P. 142–166.

14. Sun X. ACT-timely experimental study on mesoscopic damage development of frozen soil under triaxial shearing // Rock and Soil Mechanics. 2005. №8. P. 150–163.

15. Li Q. Development of Frozen Soil Model // Advances in Earth Science. 2006. №12. P. 96–103.

16. Atkinson J. The Mechanics of Soils and Foundations. CRC. Press. 2007. 448 p.

17. Баловнев В. И., Данилов Р. Г., Улитич О. Ю. Исследование управляемых ножевых систем землеройно-транспортных машин // Строительные и дорожные машины. 2017. № 2. С. 12–15.

18. Нилов В. А., Фёдоров Е. В. Разработка грунта скрепером в условиях свободного резания // Строительные и дорожные машины. 2016. № 2. С. 7–10.

19. Чмиль В. П. Насосно-аккумулятивный привод рыхлителя с автоматическим выбором угла резания // Строительные и дорожные машины. 2016. № 11. С. 18–20.

20. Кабашев Р. А., Тургумбаев С. Д. Экспериментальные исследования процесса копания грунтов роторно-дисковыми рабочими органами под гидростатическим давлением // Вестник СибАДИ. 2016. № 4. С. 23–28.

21. Сёмкин Д. С. О влиянии скорости рабочего органа на силу сопротивления резанию грунта // Вестник СибАДИ. 2017. № 1. С. 37–43.

22. Константинов Ю. В. Методика расчёта сопротивления и момента сопротивления резанию почвы прямым пластинчатым ножом фрезы // Тракторы и сельхозмашины. 2019. № 5. С. 31–39.

23. Сыромятников Ю. Н., Храмов И. С., Войнаш С. А. Гибкий элемент в составе рабочих органов роторной почвообрабатывающей рыхлительно-сепарирующей машины // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 5. С. 32–39.

24. Пархоменко Г. Г., Пархоменко С. Г. Силовой анализ механизмов перемещения рабочих органов почвообрабатывающих машин по заданной траектории // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 1. С. 47–54.

25. Драняев С. Б., Чаткин М. Н., Корявин С. М. Моделирование работы винтового Г-образного ножа почвообрабатывающей фрезы // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 7. С. 13–19.

26. Николаев В. А. Машины для обработки почвы. Теория и расчёт / В. А. Николаев. Ярославль: Изд-во ФГБОУ ВПО ЯГСХА, 2014. 358 с.

27. Николаев В. А. Резание грунта пассивными рабочими органами. Теория и расчёт / В. А. Николаев. Ярославль: Изд-во ФГБОУ ВО ЯГТУ, 2022. 388 с.

REFERENCES

1. Zykov B. I. *Teorija rabochih processov stroitel'nyh mashin* [Workflow theory of construction machinery]. Yaroslavl: Izd. JaGTU, 2003. 114 p. (in Russ.)
2. Zhuk A. F. *Teoreticheskoe obosnovanie racional'noj tehnologicheskoy shemy i parametrov rotatsionnogo pluga*. Sbornik nauchnyh trudov «Teorija i raschjot

pochvoobrabatyvajushhih mashin» [Theoretical substantiation of rational technological scheme and parameters of Rotary plow. Collection of scientific works «Theory and calculation of tillage machines». T 120. Moscow, «Mashinostroenie», 1989: 145-153. (in Russ.)

3. Popov G. F. *Rabochie organy frez* [Working bodies of the cutters]. Moscow: Materialy NTS VISHOM. Vyp. 27. ONTI VISHOM, 1970: 490-497.

4. Karasjov G. N. Opređenje sily rezanija grunta s uchjotom uprugih deformacij pri razrushenii [Definition of the cutting force of soil considering elastic deformation at fracture]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2008; 4: 36-42. (in Russ.)

5. Karnauhov A. I., Orlovskij S. N. Opređenje zatrat udel'noj jenerгии na process rezanija lesnyh pochv torcevyimi frezami [Costing of specific energy on the cutting process of forest soils end mills]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 1: 20-22. (in Russ.)

6. Kravec I. M. Opređenje kriticheskoj glubiny rezanija pri kombinirovannom rezanii gruntov gidrofrezoj [Determine critical cutting depth when combined cutting soils gidrofrezoj]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 5: 47-49. (in Russ.)

7. Kirillov F. F. Determinirovannaja matematicheskaja model' vremennogo raspredelenija t'jagovogo usilija dlja mnogorezcovykh rabochih organov zemlerojnyh mashin [Deterministic mathematical model of the temporal distribution of traction for mnogorezcovykh working bodies of earthmoving machines]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 11: 44-48. (in Russ.)

8. Berestov E. I. Vlijanie trenija grunta po poverhnosti nozha na soprotivlenie rezaniju [Influence of friction of soil on the surface of the knife cutting resistance]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 11: 34-38. (in Russ.)

9. Vershinin A. V., Zubov V. S., Tjul'nev A.M. Povyshenie jeffektivnosti diskofrezemyh rabochih mehanizmov dlja razrabotki m'jorzlyh gruntov [Improving the efficiency of the working mechanisms for the development of diskofrezemyh m'jorzlyh soil]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2012; 8: 42-44. (in Russ.)

10. Balovnev V. I., Nguen Z. Sh. Opređenje soprotivlenij pri razrabotke gruntov ryhlitelem po integral'nomu pokazatelju prochnosti [Identification of resistances when designing primers Ripper by a combined indicator of strength]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2005; 3: 38-40. (in Russ.)

11. Ryabets N., Kurzhner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy. *Cold Regions Science and Technology*. 2003; 36:115-128.

12. Liu X., Liu P. Experimental research on the compressive fracture toughness of wing fracture of frozen soil. *Cold Regions Science and Technology*. 2011; 65: 421-428.

13. Talalay P. G. Subglacial till and Bedrock drilling. *Cold Regions Science and Technology*. 2013; 86: 142-166.

14. Sun X. ACT-timely experimental study on meso-scopic damage development of frozen soil under triaxial shearing. *Rock and Soil Mechanics*. 2005; 8: 150-163.

15. Li Q. Development of Frozen Soil Model. *Advances in Earth Science*. 2006; 12: 96-103.

16. Atkinson J. The Mechanics of Soils and Foundations. CRC. Press. 2007: 448.

17. Balovnev V. I., Danilov R. G., Ulitich O. Ju. Issledovanie upravljajemyh nozhevyh sistem zemlerojno-transportnyh mashin [Study of guided knife systems

of ground-moving vehicles]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2017; 2: 12-15. (in Russ.)

18. Nilov V. A., Fjodorov E. V. Razrabotka grunta skreperom v uslovijah svobodnogo rezanija [Ground development with a scraper in free cutting conditions]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2016; 2: 7-10. (in Russ.)

19. Chmil' V. P. Nasosno-akkumulativnyj privod ryhlitelja s avtomaticheskim vyborom ugla rezanija [Pump-accumulating ripper drive with automatic cutting angle selection]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2016; 11: 18-20. (in Russ.)

20. Kabashev R. A., Turgumbaev S. D. Jeksperimental'nye issledovanija processa kopanija gruntov rotorno-diskovymi rabochimi organami pod gidrostaticheskim davleniem [Experimental studies of the process of digging soils by rotary-disk working organs under hydrostatic pressure]. *Vestnik SibADI*. 2016; 4: 23-28. (in Russ.)

21. Sjomkin D.S. O vlijanii skorosti rabocheho organa na silu soprotivlenija rezaniju grunta [On the impact of the speed of the working body on the force of resistance to ground cutting]. *Vestnik SibADI*. 2017; 1: 37-43. (in Russ.)

22. Konstantinov Ju. V. Metodika raschjota soprotivlenija i momenta soprotivlenija rezaniju pochvy prjamym plastinchatym nozhom frezy [The method of calculating resistance and the moment of resistance to soil cutting with a straight plate cutter knife]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2019; 5: 31-39. (in Russ.)

23. Syromjatinikov Ju. N., Hramov I. S., Vojnash S. A. Gibkij jelement v sostave rabochih organov rotornoj pochvoobrabatyvajushhej ryhlitel'no-separirujushhej mashiny [Flexible element in the working organs of the rotary soil processing loosening and separating machine]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2018; 5: 32-39. (in Russ.)

24. Parhomenko G. G., Parhomenko S. G. Silovoj analiz mehanizmov peremeshhenija rabochih organov pochvoobrabatyvajushhih mashin po zadannoj traektorii [Power analysis of the mechanisms of movement of working bodies of soil processing machines on a given trajectory]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2018; 1: 47-54. (in Russ.)

25. Dranjaev S. B., Chatkin M. N., Korjavin S. M. Modelirovanie raboty vintovogo G-obraznogo nozha pochvoobrabatyvajushhej frezy [Simulation of the work of a screw G-shaped knife soil cutter]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2017; 7: 13-19. (in Russ.)

26. Nikolaev V. A. *Mashiny dlja obrabotki pochvy. Teorija i raschjot* [Soil processing machines. Theory and calculation]. Jaroslavl': Izd-vo FGBOU VPO JaGSHA, 2014: 358. (in Russ.)

27. Nikolaev V. A. *Rezanie grunta passivnymi rabochimi organami*. Teorija i raschjot [Cutting the soil by passive working organs. Theory and Calculation]. Jaroslavl': Izd-vo FGBOU VO JaGTU, 2022: 388. (in Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Николаев Владимир Анатольевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительные и дорожные машины».

AUTHOR INFORMATION

Vladimir A. Nikolayev. Dr. of Sci., Professor of the Construction and Road Machinery Department.