

Методика определения оптимальных геометрических параметров и режимов резания дисковых фрез для прорезания щелей в талых и мерзлых минеральных грунтах

С.Н. Орловский^{1a}, А.И. Карнаухов^{2b}, Ю.Л. Пушков^{3c}, В.А. Соколова^{4d}, А.А. Мельберт^{5e},
А.С. Кривоногова^{3f}, А.М. Иванов^{3g}

¹ Красноярский государственный аграрный университет, пр. Мира, 90, Красноярск, Россия

² Сибирский государственный аэрокосмический университет им. М.Ф. Решетнёва, пр. Мира, 82, Красноярск, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова,

Институтский пер. 5, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, ул. Большая Морская, 18, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, пр. Ленина, 46, Барнаул, Россия

^a orlovskiysergey@mail.ru, ^b sky_angel_33@mail.ru, ^c pushkov_yura@mail.ru, ^d sokolova_vika@inbox.ru,

^e aamelbert@mail.ru, ^f kas.spb.lta@mail.ru, ^g andreyiv1997@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-8904-834X>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-7284-2050>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-2755-5634>,

^d <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-3973-8315>, ^f <https://orcid.org/0000-0001-6320-7197>,

^g <https://orcid.org/0000-0002-4118-6740>

Статья поступила 16.01.2023, принята 03.02.2023

Разработка методики аналитического определения энергоёмкости прокладки щелей в прочных и мерзлых минеральных грунтах дисковыми фрезами, размеров и режимов резания фрезы на стадии проектирования позволит повысить производительность землеройных орудий, снизить их массу, сократить сроки создания новой техники. В данной работе приведены результаты оптимизации режимов резания мерзлых минеральных грунтов дисковыми фрезами различных типов и конструкций резцов. Ранее проведенные исследования по резанию грунтов дисковыми фрезами позволили составить физико-математическую модель процесса дробления грунта по элементам технологического процесса, вывести обобщенные аналитические выражения по определению затрат удельной работы на резание в зависимости от его режимов, физико-механических свойств разрабатываемой среды, конструктивных и геометрических параметров фрезерных устройств. Использование кинетической энергии, аккумулируемой во вращающихся массах их рабочих органов для преодоления перегрузок позволяет повысить КПД агрегатов и уменьшить расход топлива при выполнении технологического процесса. Целью данной работы является разработка программы оптимизации геометрических параметров фрезерных рабочих органов и режимов их работы на стадии проектирования, непосредственное использование результатов расчетов в конструкторских разработках. В работе представлены данные экспериментальной проверки результатов исследований на макетном образце агрегата, определена адекватность теоретических предпосылок. Даны рекомендации для определения оптимальных геометрических параметров и режимов резания фрез на стадии проектирования. Создание высокопроизводительных малоэнергоёмких агрегатов требует всестороннего теоретического и экспериментального изучения их динамики и характера процессов взаимодействия рабочих органов с внешней средой, решения задач обоснования параметров и режимов работы, а также снижения затрат энергии на выполнение технологического процесса.

Ключевые слова: резание грунтов; конструкции резцов; динамика; резание; отбрасывание; экскавация; энергоёмкость; компоновка, конструкция.

Procedure for determining optimal geometric parameters and cutting modes of disc cutters for cutting slots in melted and frozen mineral soils

S.N. Orlovskiy^{1a}, A.I. Karnaukhov^{2b}, Yu.L. Pushkov^{3c}, V.A. Sokolova^{4d}, A.A. Melbert^{5e},
A.S. Krivonogova^{3f}, A.M. Ivanov^{3g}

¹ Krasnoyarsk State Agrarian University; 90, Mira Pros., Krasnoyarsk, Russia

² Reshetnev Siberian State Aerospace University; 82, Mira Pros., Krasnoyarsk, Russia

³ St. Petersburg State Forest Technical University; 5, Institutsky Ave., St. Petersburg, Russia

⁴ Higher School of Technology and Energy of St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 18, Bolshaya Morskaya St., St. Petersburg, Russia

⁵ Polzunov Altai State Technical University; 46, Lenin Ave., Barnaul, Russia

^a orlovskiysergey@mail.ru, ^b sky_angel_33@mail.ru, ^c pushkov_yura@mail.ru, ^d sokolova_vika@inbox.ru,

^e aamelbert@mail.ru, ^f kas.spb.lta@mail.ru, ^g andreyiv1997@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-8904-834X>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-7284-2050>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-2755-5634>,

^d <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-3973-8315>, ^f <https://orcid.org/0000-0001-6320-7197>,

^g <https://orcid.org/0000-0002-4118-6740>

Received 16.01.2023, accepted 03.02.2023

The development of a methodology for analytical determination of the energy capacity of laying slots in strong and frozen mineral soils with disk cutters, geometric parameters and cutting modes of working tools at the design stage will increase the productivity of earth-moving tools, reduce their weight, and reduce the time for creating new equipment. This paper presents the results of optimization of cutting modes of frozen mineral soils with disc cutters of various types and cutter structures. Earlier studies on soil cutting by milling type working tools made it possible to draw up a physical and mathematical model of the soil destruction process according to the elements of the technological process, to derive generalized analytical expressions for determining the costs of specific work on cutting depending on its modes, the physical and mechanical properties of the developed medium, structural and geometric parameters of milling devices. Use of kinetic energy accumulated in rotating masses of their working members to overcome overloads makes it possible to increase efficiency of units and reduce fuel consumption during process. The purpose of this work is to develop a program for optimizing the geometric parameters of milling tools and their operation modes at the design stage, direct use of the results of calculations in design developments. The work presents the data of experimental verification of the results of studies on a mock-up sample of the unit, the adequacy of theoretical prerequisites is determined. Recommendations are given to determine the optimal geometric parameters and cutting modes of cutters at the design stage. The creation of high-performance low-power units requires a comprehensive theoretical and experimental study of their dynamics and nature of the processes of interaction of working bodies with the environment, solving the problems of justifying parameters and operating modes, as well as reducing energy costs for the process.

Keywords: soil cutting; cutter structures; dynamics; cutting; discarding; excavation; energy capacity; layout; design.

Введение. Объем земляных работ, выполняемых в зимний период, непрерывно возрастает, причем наиболее трудоемкой операцией является разработка мерзлых грунтов [1; 2; 6; 7]. Высокая механическая прочность и абразивность мерзлых грунтов, отрицательная температура окружающей среды предъявляют особые требования к конструкциям машин для работы в этих условиях. При механическом способе рыхления и разработки мерзлого грунта применяются баровые и дискофрезерные машины, разрезающие мерзлый слой на полосы или блоки.

Цель работы — поиск оптимальных режимов резания и геометрических параметров резцов на стадии конструирования аналитическим методом и проектирование на основе полученных данных рабочего органа орудия.

Материалы и методы исследования. Предохранение грунтов от промерзания в практике мелиоративного строительства до последнего времени не получило широкого распространения. В настоящее время проектируются и изготавливаются специальные машины и орудия для производства работ на мелиоративном строительстве в зимнее время. Вместе с этим мелиоративно-строительные организации при отсутствии или недостатке специальных машин сами проводят изменения в конструкциях существующих орудий и механизмов, способствующих более эффективному рыхлению мерзлых грунтов.

Эффективность использования фрезерных рабочих органов при нарезании щелей в мерзлых грунтах доказана многолетней практикой эксплуатации этих машин. По сравнению с баровым дискофрезерное оборудование отличается простотой конструкции и долговечностью работы, требует меньших затрат на изготовление и в процессе работы менее энергоемко.

Щелерезные машины могут быть использованы при отрывке траншей, каналов и различных других земляных сооружений совместно с многоковшовыми и одноковшовыми экскаваторами и другими машинами и орудиями.

В данной статье рассматривается орудие, предназначенное для прорезания щелей как в талых, так и в мерз-

лых грунтах, которое агрегируется с трактором ДТ-75МХ-С4. Орудие предназначено для прорезания щелей в талых и мерзлых грунтах для прокладки кабельных коммуникаций без существенных нарушений поверхности почвы, нарезки щелей и блоков в мерзлых грунтах для облегчения процесса их разработки одноковшовыми экскаваторами [7–9; 11; 12].

Направление работы — обеспечить создание конструкции орудия, которое по своим технико-экономическим показателям могло бы конкурировать с отечественными и зарубежными орудиями аналогичного класса. Возможно использование орудия для облегчения работы одноковшовых экскаваторов при строительстве осушительных каналов в зимний период посредством прорезания сети параллельных щелей по трассе будущего канала.

Разработка методики аналитического определения энергоемкости выполнения щелей в талых и мерзлых минеральных грунтах, геометрических параметров и режимов резания дискофрезерных рабочих органов на стадии проектирования позволит повысить производительность орудий, снизить их массу, сократить сроки разработки новой техники [5].

Рабочая скорость перемещения орудия принята в расчетах равной 0,1 и 0,25 м/с по мерзлым и талым грунтам соответственно, диаметр фрезы по концам ножей выбран конструктивно, из расчета достижения требуемой глубины щели составляет 1 600 мм.

Все описанные и остальные параметры, необходимые для расчета орудия, заданы как исходные данные к проекту и приведены в табл. 1. Агрегат включает трактор ДТ-75МХ, на задней навеске которого смонтировано щелерезное орудие с активным рабочим органом в виде дисковой фрезы. Орудие состоит из рамы, фрезерного рабочего органа, конического редуктора, карданной передачи и защитного кожуха.

Орудие работает следующим образом: трактор протаскивает орудие; дисковая фреза прорезает в торфяной залежи щель глубиной 0,6 м.

Таблица 1. Исходные данные для математической модели проектируемого орудия

Наименование параметра	Значение
Диаметр фрезы по концам режущих ножей, O_{ϕ} , м	1,6 ^{+0,02}
Глубина фрезерования, H_{ϕ} , м	0,6
Ширина щели, м	0,052
Рабочая поступательная скорость, $U_{д}$, м/с	0,09 и 0,26
Окружная скорость фрезы $V_{р}$, м/с	5,5
Число резцов z , шт.	18
Угол резания, β_0 , град.	70°
Пнистость разрабатываемой среды, ξ %	2
Ширина лезвия ножа, В, м	0,05
Коэффициент сопротивления вязкопластическому течению грунта $Ko_{срг}$	111060
КПД отбрасывания разрабатываемого материала, η	0,85
КПД трансмиссии, $\eta_{тр}$	0,85
<i>Физико-механические свойства разрабатываемых грунтов</i>	
Грунты в талом состоянии	
Угол внешнего трения грунта, φ_r , град.	24,5°
Коэффициент внешнего трения грунта f_1	0,45
Угол внутреннего трения грунта, ρ_r , град.	29°
Коэффициент внутреннего трения грунта f_2	0,55
Удельный вес грунта, $\gamma_{0г}$ Н/м ³	17850
Предельное напряжение сдвига грунта, Θ_r , Па	68670
Грунты в мерзлом состоянии	
Угол внешнего трения грунта, $\varphi_{r,з}$, град.	29,5°
Коэффициент внешнего трения грунта f_1	0,56
Угол внутреннего трения грунта, ρ_r , град.	12°
Коэффициент внутреннего трения грунта f_2	0,21
Удельный вес грунта, $\gamma_{0г}$ Н/м ³	17850
Предельное напряжение сдвига грунта, Θ_r , Па	2 500 000

Для условий работы фрезы удельная работа e_{Σ} может быть представлена в виде суммы [4; 6; 16; 20]:

- затрат энергии на преодоления упругих сил резания грунта;
- преодоления сопротивления вязкопластического течения продуктов резания при прохождении ножом дуги контакта с разрабатываемой средой;
- прорезания древесных включений (корней и валежа);
- сообщение кинетической энергии продуктам резания;
- преодоление трения в трансмиссии привода рабочего органа орудия;
- усилия буксирования орудия по опорной поверхности;
- самопередвижение базового трактора.

Удельная работа на преодоление упругих сил резания грунта определяется с учетом углов резания взаимодействия ножа фрезы с разрабатываемой средой по формуле [2; 13; 15; 21]:

$$e_{уп} = \tau \cdot \left(\frac{1}{tg \psi'_0} + \frac{1}{tg \psi} \right), \text{ Дж/м}^3, \quad (1)$$

где τ — сопротивление сдвигу в плоскости, проходящей под углом ψ'_0 , к направлению подачи, Па.

Угол сдвига стружки для минерального грунта ψ'_0 в плоскости резания, град. (рис. 1):

$$\psi'_0 = 90 - \frac{\varphi - \rho + \beta'_0}{2}, \quad (2)$$

где β'_0 — угол резания, приведенный к направлению подачи, град.; φ и ρ — углы внешнего и внутреннего трения разрабатываемого грунта, град.

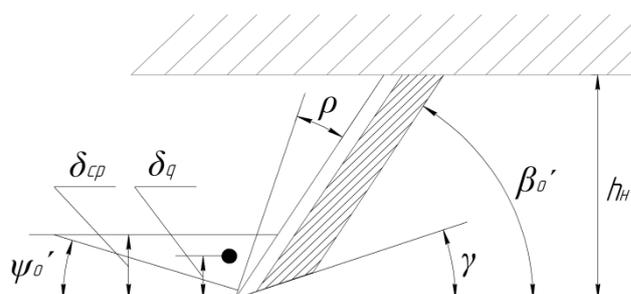


Рис. 1. Схема резания ножом торцевой фрезы в плоскости, параллельной продольной оси тракторного агрегата

Соппротивление сдвигу продуктов резания в плоскости, проходящей под углом ψ'_0 , к направлению подачи, τ , Pa , определяется по формуле:

$$\tau = \theta + P_u \cdot f_2, \quad (3)$$

где θ — предельное напряжение сдвига подстилки и минерального грунта, H/m^2 ; P_u — нормальное давление от действия инерционных сил в плоскости, проходящей под углом ψ' к направлению подачи, Pa ; f_2 — коэффициент внутреннего трения грунта.

при $\delta_q < \delta_{cp}$

$$P_u = \frac{\gamma_0 V_c^2}{q} \cdot \frac{\sin \beta'_0 \sin \psi'_0 \cos^2 \alpha \cos^2 \psi \sin(\varphi + \psi'_0 + \beta'_0 - 90)}{\cos \varphi \sin^2(90 - \psi + \alpha)} \quad (5)$$

при $\delta_q \geq \delta_{cp}$

$$P_u = \frac{\gamma_0 V_c^2}{g} \cdot \frac{\sin^2 \psi'_0 \cos^2 \alpha \cos^2 \psi}{\sin(90 - \psi + \alpha)} \quad (6)$$

Толщина срезаемой стружки разрабатываемой среды δ_{cp} определяется по формуле:

$$\delta_{cp} = \frac{V_d}{n \cdot z}, \quad (7)$$

где V_d — скорость движения рабочего органа орудия в плоскости фрезерного диска, m/c ; n — частота вращения фрезы, c^{-1} ; z — число ножей фрезы (групп), $шт$.

Результаты и обсуждение. Подставив числовые значения в формулы, получим:

– для резания грунта:

$$\psi'_{o.t.g.} = 90 - \frac{24,5^0 - 29^0 + 70^0}{2} = 57,25^0$$

$$\psi'_{o.m.g.} = 90 - \frac{29,5^0 - 12^0 + 70^0}{2} = 46,25^0$$

$$\psi_{t.g.} = 90 - \frac{90^0 + 24,5^0 + 29^0}{2} = 18,25^0$$

$$\psi_{m.g.} = 90 - \frac{90^0 + 29,5^0 + 12^0}{2} = 24,25^0$$

На основании приведенных выше зависимостей произведем расчеты затрат энергии на прорезание щелей в талых и мерзлых минеральных грунтах согласно исход-

Нормальное давление от действия инерционных сил в плоскости, проходящей под углом ψ'_0 , к направлению подачи, P_u , Pa , определяется по двум уравнениям в зависимости от толщины деформируемого слоя δ_q грунта δ_{gr} и подстилки δ_{qp} , $мм$. Толщина деформируемого слоя определяется по выражению:

$$\delta_q = \frac{\delta_{cp} \sin \beta'_0 \sin(\varphi + \psi'_0 + \beta'_0 - 90)}{\sin \psi'_0 \cos \varphi} \quad (4)$$

ным данным, приведенным в табл. 1. Расчеты выполним для скоростей движения 0,33 и 0,96 км/ч (0,092 и 0,27 м/с) при скорости резания 5,5 м/с (частоте вращения фрезерного диска диаметром 1 600 мм 1,125 c^{-1}) [4; 10; 14; 17]. Подставляя численные значения, определим затраты энергии на резание грунта. Для принятого режима толщина срезаемой стружки составит:

$$\delta_{cp.tg} = \frac{0,27}{1,125 \cdot 18} = 0,0133 м = 13,3 мм$$

$$\delta_{cp.mg} = \frac{0,092}{1,125 \cdot 18} = 0,0045 м = 4,5 мм$$

$$\delta_{g.mz} = \frac{13,3 \cdot \sin 70^0 \cdot \sin(24,5^0 + 57,25^0 + 70^0 - 90^0)}{\sin 57,25^0 \cdot \cos 24,5^0} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{13,3 \cdot 0,9397 \cdot 0,8721}{0,8425 \cdot 0,9107} = 14,2 мм$$

$$\delta_{g.mz} = \frac{4,5 \cdot \sin 70^0 \cdot \sin(29,5^0 + 46,25^0 + 70^0 - 90^0)}{\sin 46,25^0 \cdot \cos 29,5^0} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{4,5 \cdot 0,9397 \cdot 0,8271}{0,7218 \cdot 0,8704} = 5,47 мм$$

для случая $\delta_q > \delta_{cp}$ P_u рассчитывается по формуле (6).

Расчет резания талого грунта:

$$P_{u.mz} = \frac{17850 \cdot 5,5^2}{9,81} \cdot \frac{\sin^2 57,25^0 \cdot \cos^2 18,25^0}{\sin 71,75^0} = \frac{17850 \cdot 5,5^2}{9,81} \cdot \frac{0,8406^2 \cdot 0,95^2}{0,9500} = 36878,16 Pa$$

Расчет резания мерзлого грунта:

$$P_{u.mz} = \frac{17850 \cdot 5,5^2}{9,81} \cdot \frac{\sin^2 46,25^0 \cdot \cos^2 24,25^0}{\sin 65,75^0} = \frac{17850 \cdot 5,5^2}{9,81} \cdot \frac{0,7218^2 \cdot 0,9114^2}{0,9114} = 25869,75 Pa$$

$$\tau_{тг} = 68670 + 36878,16 \cdot 0,5543 = 58051,49 Pa.$$

$$\tau_{тг} = 2500000 + 25869,75 \cdot 0,2100 = 2505432,64 Pa$$

$$e_{зп.м.з} = 58051,49 \cdot \left(\frac{1}{\operatorname{tg} 57,25^0} + \frac{1}{\operatorname{tg} 18,25^0} \right) = 58051,49 \cdot \left(\frac{1}{1,5517} + \frac{1}{0,3288} \right) = 213965,36 Дж/м^3$$

$$e_{\text{упр.м.г}} = 2505432,64 \cdot \left(\frac{1}{\text{tg}46,25^{\circ}} + \frac{1}{\text{tg}24,25^{\circ}} \right) = 2505432,64 \cdot \left(\frac{1}{1,0428} + \frac{1}{0,4494} \right) = 7975265,97 \text{ Дж/м}^3$$

Производительность орудия П, м³/с, по резанию грунта П_г определяется по выражениям [18; 19; 22–25]:

$$P_{\text{г}} = V_{\text{д}} \cdot B \cdot H, \quad (8)$$

где В — ширина траншеи, м; Н — глубина траншеи, м; V_д — скорость резания, м/с

$$P_{\text{мг}} = 0,092 \cdot 0,054 \cdot 0,6 = 0,0029 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$P_{\text{тг}} = 0,27 \cdot 0,054 \cdot 0,6 = 0,0087 \text{ м}^3/\text{с}$$

Затраты мощности для преодоления сил сопротивления резанию грунта N_{е. упр} определяются по выражению:

1. При толщине деформируемого слоя δ_q < δ_{ср} по формуле:

$$\lambda_{\rho\sigma} = \sqrt{2} \cdot l \cdot \left[\frac{\cos \alpha \cdot \sin \beta'_0 \cdot \sin(\psi + \psi'_0 + \beta'_0 - 90)}{2 \cdot \delta_{\text{ср}} \cdot \sin(90 - \psi + \alpha)} \cdot \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha \cdot \text{tg}^4 \psi} + \frac{1}{B} \right], \quad (10)$$

2. При толщине деформируемого слоя δ_q ≥ δ_{ср} по формуле:

$$\lambda_{\rho\tau} = \sqrt{2} l_{\tau} \left[\frac{\text{Cos} \alpha \text{Cos} \beta'_0}{2 \delta_{\text{ср}} \text{Sin}(90 - \psi)} \cdot \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha \text{tg}^4 \psi} + \frac{1}{B} \right], \quad (11)$$

где l — длина дуги резания, м, длина дуги резания α₀, рад может быть определена по выражению:

$$\alpha_0 = \arccos \cdot \left(1 - \frac{H_{\phi}}{R_{\phi}} \right) \text{ рад}. \quad (12)$$

Подставляя значения глубины фрезерования грунта, получим:

$$\alpha_{0\sigma} = \arccos \cdot \left(1 - \frac{0,6}{0,8} \right) = 75,5^{\circ} = 1,32 \text{ рад}$$

Подставляя значения глубины фрезерования грунта и суммарное, получим:

$$l_{\Sigma} = R \cdot \alpha_0 = 0,8 \cdot 1,32 = 1,06 \text{ м} — \text{ полная длина дуги резания;}$$

Подставив численные значения в формулы (12) или (13) в зависимости от δ_q ≥ δ_{ср} или δ_q < δ_{ср}, получим затраты энергии по расчетным вариантам:

Экспкавация талого грунта при V_д = 0,27 м/с и V_р = 5,5 м/с для δ_q > δ_{ср}

$$\lambda_{\rho\sigma} = \sqrt{2} \cdot 1,06 \cdot \left[\frac{\text{Cos}70^{\circ}}{2 \cdot 0,0133 \cdot \text{Sin}(90^{\circ} - 18,25^{\circ})} \cdot \sqrt{1 + \text{tg}^4 18,25^{\circ}} + \frac{1}{0,054} \right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 1,5 \cdot \left(\frac{0,342}{2 \cdot 0,0133 \cdot 0,95} \cdot \sqrt{1 + 0,3288^4 + 18,51} \right) = 48,17 \text{ Па}$$

Экспкавация мерзлого грунта при V_д = 0,092 м/с и V_р = 5,5 м/с для δ_q > δ_{ср}

$$\lambda_{\rho\sigma} = \sqrt{2} \cdot 1,06 \cdot \left[\frac{\text{Cos}70^{\circ}}{2 \cdot 0,0045 \cdot \text{Sin}(90^{\circ} - 24,25^{\circ})} \cdot \sqrt{1 + \text{tg}^4 24,25^{\circ}} + \frac{1}{0,054} \right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 1,5 \cdot \left(\frac{0,342}{2 \cdot 0,0045 \cdot 0,9121} \cdot \sqrt{1 + 0,4494^4 + 18,51} \right) = 91,50 \text{ Па}$$

$$e_{\lambda} = K_{\tau} \times \lambda_{\rho\tau} \quad (13)$$

$$K_{\text{оср}} = 11060$$

$$K_{\text{тер}} = K_{\text{оср}} \cdot \frac{\tau}{\Theta},$$

$$K_{\text{тер.тг}} = 111060 \times \frac{58051}{68670} = 93490$$

$$K_{\text{тер.мг}} = 111060 \times \frac{2505432,64}{25000000} = 110840$$

$$e_{\lambda\text{т.г}} = 93490 \cdot 48,17 = 4503750 \text{ Дж/м}^3$$

$$e_{\lambda\text{м.г}} = 110840 \cdot 91,5 = 10141860 \text{ Дж/м}^3$$

$$N_{e.\lambda} = \Pi \cdot e_{\lambda} \quad (14)$$

$$N_{e.\lambda_{тг}} = 0,0087 \cdot 4503750 = 13918 \text{ Вт}$$

$$N_{e.\lambda_{мг}} = 0,0029 \cdot 10141860 = 18941 \text{ Вт}$$

Затраты мощности на прорезание древесных включений, N_n, Bm , определяется по формуле [15]:

$$N_{нд} = e_n \cdot \Pi_{\Sigma}, \quad (15)$$

где e_n — удельная работа на прорезание древесины, $Дж/м^3$, определяемая по эмпирической формуле:

$$e_n = K_{\pi} \cdot E \cdot 10^3, \quad (16)$$

$$K_{\pi} = 78 - 0,9 \cdot V_p + \frac{60}{\delta_{cp}}, \quad (17)$$

где E — отношение объема фрезеруемых древесных включений к объему прокладываемой щели (степень пниности в процентах).

$$K_{птг} = 78 - 0,9 \cdot 5,5 \cdot \frac{60}{0,0133} = 4584,33,$$

$$K_{пмг} = 78 - 0,9 \cdot 5,5 \cdot \frac{60}{0,0045} = 13406,38,$$

$$e_{птг} = 4584,33 \cdot 0,02 \cdot 10^3 = 91686,6 \text{ Дж/м}^3,$$

$$e_{пмг} = 13406,38 \cdot 0,02 \cdot 10^3 = 268127,6 \text{ Дж/м}^3,$$

$$N_{тг} = 91686,6 \cdot 0,0087 = 797 \text{ Вт.}$$

$$N_{мг} = 268127 \cdot 0,0029 = 777,5 \text{ Вт.}$$

Мощность на сообщение кинетической энергии экскавируемому грунту $N_{отбр.г}, Bm$, определяется по формуле [11]:

$$N_{отбр.г} = \frac{\Pi z \cdot \gamma_0 \cdot V_p^2 \cdot \eta}{2 \cdot g}. \quad (18)$$

Подставив численные значения, получим:

$$N_{отбр.г} = \frac{0,0087 \cdot 17850 \cdot 5,5^2 \cdot 0,7}{2 \cdot 9,81} = 173,30 Bm$$

$$N_{отбр.мг} = \frac{0,0029 \cdot 17850 \cdot 5,5^2 \cdot 0,7}{2 \cdot 9,81} = 57,69 Bm.$$

Затраты мощности $N_{тр}, Bm$, на трение в трансмиссии рабочих органов рассчитываются по формуле:

$$N_{тр} = (N_{рез} + N_{отбр}) \times (1 - \eta_{cp}). \quad (19)$$

Подставив численные значения и $\eta_{cp} = 0,85$, получим:

$$N_{тр.тг} = (1861,5 + 13918 + 797 + 173,3) \times (1 - 0,85) = 2512 \text{ Вт}$$

$$N_{тр.мг} = (23128 + 18941 + 777,5 + 57,7) \times (1 - 0,85) = 6435 \text{ Вт.}$$

Затраты мощности $N_{пер}, Bm$, на передвижение трактора и буксирование им орудия на опорной лыже по лесной подстилке определяются по выражению:

$$N_{пер} = V_{\partial e} \cdot \left(\frac{G_{mp} \cdot f_{mp}}{\eta_{mp}} + G_{op} \cdot f_{op} \right), \quad (20)$$

где $G_{тр}$ — масса трактора, H ; $V_{тр}$ — скорость движения, $м/с$; $f_{тр}$ — коэффициент сопротивления качению трактора, $f_{тр} = 0,12$; $\eta_{тр}$ — КПД трансмиссии ходовой части трактора $0,78$; f_{op} — коэффициент трения опорной лы-

жи орудия о грунт, $f_{op} = 0,65$; G_{op} — масса орудия, приходящаяся на опорную лыжу, H .

Для трактора ДТ-75М массой $71,6 \text{ кН}$ и орудия массой 10 кН затраты мощности, Bm , по скоростям движения $0,092$ и $0,27 \text{ м/с}$ составят в численном выражении:

$$N_{пер.мг} = 0,092 \cdot \left(\frac{71600 \cdot 0,12}{0,78} + 10000 \cdot 0,65 \right) = 1611 Bm,$$

$$N_{пер.тг} = 0,27 \cdot \left(\frac{71600 \cdot 0,12}{0,78} + 10000 \cdot 0,65 \right) = 4728 Bm.$$

Мощность, $кВт$, на протаскивание грунта по бермообразователям $N_{берм}$ определится по формуле:

$$N_{берм} = 2 \frac{F \cdot V}{10^3},$$

где F — суммарное тяговое сопротивление, H ; V — рабочая скорость, $м/с$.

$$F = G_{пр} \times \text{Cos} \alpha_6 \times (\text{tg} \alpha_6 + f) \times [\text{Sin} \varphi \times \text{Cos} \alpha_6 + \text{Cos} \varphi \times \text{Sin}(\alpha_6 + \varepsilon')], \quad (21)$$

где α_6 — угол захвата, $град.$; ε' — угол отклонения линии выноса грунта в кавальер, $рад.$; $\varepsilon' = 0,025 \alpha_6 + 15,2^0$; $G_{пр}$ — вес призмы волочения, H .

$$G_{пр} = V_{пр} \cdot \gamma$$

$$V_{пр} = \frac{b_0^2 (\text{Ctg} \alpha + \text{Ctg} \varepsilon') \delta_{\varepsilon}}{2},$$

где b_0 — ширина откоса кавальера, $м$;

$$b_0 = \frac{h_k}{\text{Sin} \varphi};$$

$$h_k = \sqrt{\frac{S_k K_p}{2 \text{ctg} \varphi}}$$

где S_k — площадь разрабатываемого грунта, $м$; K_p — коэффициент разрыхления грунта.

$$h_k = \sqrt{\frac{0,0324 \times 1,3}{2 \times 1,823}} = 0,11 \text{ м}$$

$$b_0 = 0,11 / 0,48 = 0,22 \text{ м}$$

$$V_{пр} = \frac{0,22^2 (1,73 + 8,14) 0,3 \times 0,48}{2} = 0,034 \text{ м}^3$$

$$G_{пр} = 0,034 \times 17000 = 584,7 \text{ Н}$$

$$F = 584,7 \times 0,866 \times (0,577 + 0,56) \times (0,48 \times 0,866 + 0,875 \times 0,602) = 560,55 \text{ Н}$$

$$N_{берм.мг} = 2 \cdot \frac{560,55 \cdot 0,09}{10^3} = 0,103 \text{ кВт}$$

$$N_{берм.тг} = 2 \cdot \frac{560,55 \cdot 0,27}{10^3} = 0,309 \text{ кВт}$$

Полные затраты мощности на выполнение орудием технологического процесса по всем вариантам представлены в табл. 2, а также в виде диаграмм на рис. 2.

Значения коэффициентов загрузки двигателей тракторов определяются по выражению:

$$K_3 = \frac{N_{\Sigma}}{N_e}, \quad (22)$$

где N_e — номинальная эксплуатационная мощность двигателя базового энергетического средства, κBm ; N_{Σ}

— мощность, потребляемая при выполнении технологического процесса, κBm .

$$K_{3\text{тл}} = \frac{51053}{66200} = 0,77, \quad K_{3\text{мр}} = \frac{22623}{66200} = 0,34.$$

Таблица 2. Баланс затрат мощности на прокладку опорных полос в лесных почвах по элементам технологического процесса

Скорости движения, m/c	Варианты расчетов							Суммарные затраты мощности, Bm
	Затраты мощности N, Bm							
	Резание	Экспкавация	Прорезание древесных включений	Отбрасывание	Трение в трансмиссии фрезы	Бермо-очистка	Передвижение агрегата	
0,27	1 861,5	13 918	797	173,3	2 512	309	4 728	22 623
0,092	23 128	18 941	775,5	57,7	6 435	103	1 611	51 053

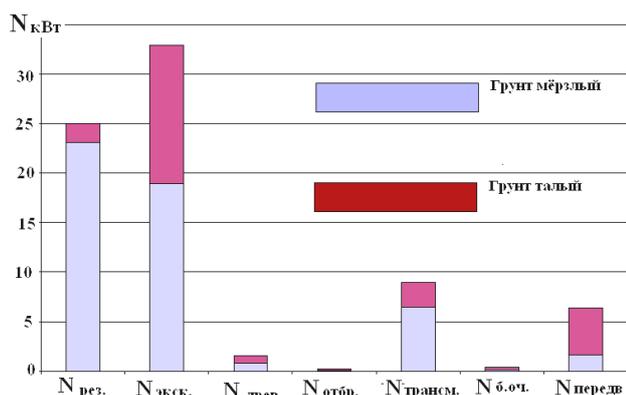


Рис. 2. Диаграмма баланса затрат мощности на прокладку щелей в талых и мерзлых грунтах дисковой фрезой

Ввиду недостаточного коэффициента загрузки щелевого орудия на талых грунтах повторно определяем

скорость движения трактора из условия достижения рекомендуемого коэффициента загрузки его двигателя 0,8–0,9.

Определение требуемой скорости в летний период проводим из расчета соответствия выбранной скорости ряду скоростей движения из технической характеристики трактора ДТ-75М номинальной мощности его двигателя N_e по формуле:

$$N' = e_{\Sigma} \cdot P' = \frac{N}{\Pi} \cdot a \cdot v \cdot V' < N_e \quad (23)$$

Подставляя численные значения, получим:

$$N'_{\text{тл}} = \frac{66200}{0,0087} \cdot 0,6 \cdot 0,054 \cdot 0,62 = 54101 Bm < 66200 Bm K_{3, \text{тл}}$$

$$= 54101 : 66200 = 0,81$$

С щелерезным орудием агрегат может выполнять технологический процесс на скорости 0,62 м/с по талому грунту и 0,09 м/с — по мерзлому при коэффициенте загрузки двигателя 0,77–0,81 соответственно.

Таблица 3. Баланс мощности агрегата

Наименование параметра	Значение	
	талый	мерзлый
Мощность необходимая на преодоление упругих сил, $N_{\text{упр}}, \kappa Bm$	5,5	12,4
Мощность необходимая на преодоление сопротивления вязкопластичного течения продуктов резания при прохождении ножом дуги контакта с залежью $N_{\lambda}, \kappa Bm$	31,4	18,3
Мощность, необходимая на прорезание древесных включений, $N_{\text{п}}, \kappa Bm$	11,6	6,8
Мощность, необходимая на сообщение кинетической энергии продуктам резания, $N_{\text{отбр}}, \kappa Bm$	2,5	1,5
Мощность, затрачиваемая на перемещение орудия и трактора по грунту, $N_{\text{б}}, \kappa Bm$	2,6	1,5
Мощность, затрачиваемая на очистку берм, $N_{\text{б.оч}}, \kappa Bm$	0,3	2,2
Мощность на передвижение трактора с орудием при выполнении технологического процесса, $N_{\text{пер}}, \kappa Bm$	13,02	23,05
Итого:	76,82	81,42
Откорректированная с учетом рациональной загрузки двигателя скорость движения $V', m/c$	0,54	0,38
Откорректированная с учетом рациональной загрузки двигателя необходимая мощность двигателя трактора $N', \kappa Bm$	82,08	86,87
Оптимальный коэффициент загрузки двигателя, K_3	0,86	0,90
Мощность двигателя базового трактора, $N_e, \kappa Bm$	66,2	

Заключение

1. Применение данной методики расчета энергоемкости резания минеральных грунтов в талом и мерзлом состоянии торцовыми фрезами по элементам технологического процесса позволяет определить затраты

энергии на прокладку щелей в конкретных почвенно-грунтовых условиях; рассчитать оптимальные режимы резания многофазных сред; определить на стадии проектирования энергоемкость процесса.

2. Оптимизация параметров и режимов работы дискофрезерных рабочих органов щелерезных орудий даст

Литература

- Орловский С.Н., Карнаухов А.И. Агрегат для прокладки минерализованных полос // Строительные и дорожные машины. 2007. № 10. С. 23.
- Орловский С.Н., Комиссаров С.В., Карнаухов А.И. Теоретическое и экспериментальное исследование резания лесных почв фрезерными рабочими органами // Вестн. КрасГАУ. 2007. № 16. С. 215-222.
- Орловский С.Н., Комиссаров С.В., Карнаухов А.И. Расчёт энергоёмкости резания лесных почв с подстилкой торцовыми фрезами и затрат мощности на резание и выполнение технологического процесса («Fresa_n»): свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ № 2007610363; заявка № 2006613951. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19.01 2007.
- Фомин В.К., Фомина Г.В. Определение энергоёмкости процесса резания винтовой фрезой машины ММК - ПГ аналитическим методом // Торфяная пром-сть. 1972. № 10. С. 12-15.
- Фомин В.К., Фомина Г.В. Методика определения энергоёмкости процесса резания торфа дисковыми фрезами аналитическим методом // Торфяная пром-сть. 1979. № 5. С. 9-13.
- Орловский С.Н. Проблемы экологии, энергосбережения и охраны окружающей среды при выполнении работ в АПК. Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2020. 265 с.
- Орловский С.Н., Карнаухов А.И. Теоретические предпосылки к обоснованию параметров и режимов работы роторных рабочих органов // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2012. № 4. С. 70-76.
- Орловский С.Н. Обоснование технологии применения и компоновки тракторного лесопожарного грунтомета // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2014. № 3. С. 79-85.
- Коршун В.Н., Карнаухов А.И., Кухар И.В. Метод анализа технологических машин для лесного хозяйства // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 2 (30). С. 163-169.
- Кухар И.В. Роторная машина для послойной обработки почв // Экологическое образование и природопользование в инновационном развитии региона. Красноярск: СибГТУ, 2014. Т. I. С. 80-81.
- Орловский С.Н. Определение энергетических и динамических параметров тракторов, режимов резания активных рабочих органов машинно-тракторных агрегатов: моногр. Красноярск: КрасГАУ, 2011. 376 с.
- Зеленин А.Н., Карасев Г.Н., Красильников Л.В. Лабораторный практикум по резанию грунтов. М.: Высш. школа, 1969. 310 с.
- Карнаухов А.И. Лесопожарные агрегаты с торцовой фрезой: концепция энергосбережения. Красноярск: СибГТУ, 2011. 219 с.
- Коршун В.Н. Роторные рабочие органы лесохозяйственных машин: концепция конструирования. Красноярск: СибГТУ, 2003. 228 с.
- Орловский С.Н., Карнаухов А.И. Агрегат для прокладки минерализованных полос // Строительные и дорожные машины. 2007. № 10. С. 24.
- Орловский С.Н. Повышение эффективности дискофрезерных щелерезных агрегатов обоснованием параметров: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Красноярск, 2000. 24 с.
- Заднепровский Р.П. Оценка возможности снижения энергоёмкости и повышения КПД при копании грунтов // Строительные и дорожные машины. 2006. № 12. С. 34-38.

возможность повысить их производительность на стадии проектирования в 1,5–2 раза по сравнению с аналогами.

- Кузнецова В.Н., Мартюков Р.А. Создание эффективных рабочих органов землеройных машин для разработки мерзлых и прочных грунтов // Строительные и дорожные машины. 2005. № 4. С. 34.
- Jones P.C., Hawkend J.H. Stump grinders. Austin: UT Press, 2014. 156 p.
- Roy Brigden. 2008. Ploughs and Ploughing (Shire Library). Shire Publications (March 4, 2008), York, UK. P. 32.
- Bell B.J., Opperman C., Whittome C. 2002. Ploughs & Ploughing Techniques. Farming Press Productions, London. P. 131.
- Bell B. 2004. The Tractor Ploughing Manual. Old Pond Publishing Ltd (1 Dec. 2004), London. 128 p.
- Beniak J., Ondruska J., Cacko V. Design Process of Energy Effective Shredding Machines for Biomass Treatment // Acta Polytechnica. 2012. V. 52. № 5. P. 133-137.
- Shoripour H. Development of automatic cutting system // Journal of agriculture research. 1971. V. 7. № 17. P. 2683-2687.
- Teggin R., Kavadamatti S., Hebbal S. Design and fabrication of machine performing multiple wood working operations. Proceeding of NRIET-2015 & Indian J. Sci. Res. 2015. V. 12. № 1. P. 162-167.

References

- Orlovskij S.N., Karnauhov A.I. Mineralized strip laying unit // Construction and Road Building Machinery. 2007. № 10. P. 23.
- Orlovskij S.N., Komissarov S.V., Karnauhov A.I. Theoretical and Experimental Study of Cutting Forest Soils by Foreground Working Bodies // The Bulletin of KrasGAU. 2007. № 16. P. 215-222.
- Orlovskij S.N., Komissarov S.V., Karnauhov A.I. Calculation of the energy capacity of cutting forest soils with bedding with end cutters and power costs for cutting and performing the technological process («Fresa_n»): svideitel'stvo ob ofic. registracii programmy dlya EVM № 2007610363; zayavka № 2006613951. Zaregistrovano v Reestre programm dlya EVM 19.01 2007.
- Fomin V.K., Fomina G.V. Determination of the energy capacity of the process of cutting with a screw cutter of the ММК - PG machine by the analytical method // Torfyanaya prom-st'. 1972. № 10. P. 12-15.
- Fomin V.K., Fomina G.V. Procedure for Determining the Energy Capacity of the Peat Cutting Process by Disk Milling Mill by Analytical Method // Torfyanaya prom-st'. 1979. № 5. P. 9-13.
- Orlovskij S.N. Problems of ecology, energy saving and environmental protection when performing work in the АПК Krasnoyarsk: Izd-vo KrasGAU, 2020. 265 p.
- Orlovskij S.N., Karnauhov A.I. Theoretical prerequisites for justifying the parameters and modes of operation of rotary working bodies // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2012. № 4. P. 70-76.
- Orlovskij S.N. Justification of the technology of application and layout of a tractor forest fire-fighting primer // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2014. № 3. P. 79-85.
- Korshun V.N., Karnauhov A.I., Kuhar I.V. Method of analysis of technological machines for forestry // Systems. Methods. Technologies. 2016. № 2 (30). P. 163-169.
- Kuhar I.V. Rotary machine for layer-by-layer soil treatment // Ekologicheskoe obrazovanie i prirodopol'zovanie v inno-

- vacionnom razvitii regiona. Krasnoyarsk: SibGTU, 2014. V. I. P. 80-81.
11. Orlovskij S.N. Determination of energy and dynamic parameters of tractors, cutting modes of active working bodies of machine-tractor units: monogr. Krasnoyarsk: KrasGAU, 2011. 376 p.
 12. Zelenin A.N., Karasev G.N., Krasil'nikov L.V. Laboratory workshop on soil cutting. M.: Vyssh. shkola, 1969. 310 p.
 13. Karnauhov A.I. Forest fire units with end milling: energy saving concept: koncepciya energosberezheniya. Krasnoyarsk: SibGTU, 2011. 219 p.
 14. Korshun V.N. Rotary working bodies of forestry machines: koncepciya konstruirovaniya. Krasnoyarsk: SibGTU, 2003. 228 p.
 15. Orlovskij S.N., Karnauhov A.I. Mineralized strip laying unit // Construction and Road Building Machinery. 2007. № 10. P. 24.
 16. Orlovskij S.N. Improvement of Efficiency of Discophreser Slitters by Justification of Parameters: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.21.01. Krasnoyarsk, 2000. 24 p.
 17. Zadneprovskij R.P. Assessment of the possibility of reducing energy capacity and increasing efficiency during soil digging // Construction and Road Building Machinery. 2006. № 12. P. 34-38.
 18. Kuznecova V.N., Martyukov R.A. Creation of effective working bodies of earthmoving machines for the development of frozen and durable soils // Construction and Road Building Machinery. 2005. № 4. P. 34.
 19. Jones P.C., Hawkend J.H. Stump grinders. Austin: UT Press, 2014. 156 p.
 20. Roy Brigden. 2008. Ploughs and Ploughing (Shire Library). Shire Publications (March 4, 2008), York, UK. P. 32.
 21. Bell B.J., Opperman C., Whittome C. 2002. Ploughs & Ploughing Techniques. Farming Press Productions, London. P. 131.
 22. Vell B. 2004. The Tractor Ploughing Manual. Old Pond Publishing Ltd (1 Dec. 2004), London. 128 p.
 23. Beniak J., Ondruska J., Cacko V. Design Process of Energy Effective Shredding Machines for Biomass Treatment // Acta Polytechnica. 2012. V. 52. № 5. P. 133-137.
 24. Shoripour H. Development of automatic cutting system // Journal of agriculture research. 1971. V. 7. № 17. P. 2683-2687.
 25. Tegg R., Kavadiatti S., Hebbal S. Design and fabrication of machine performing multiple wood working operations. Proceeding of NCRIET-2015 & Indian J. Sci. Res. 2015. V. 12. № 1. P. 162-167.