

Обоснование и выбор основных параметров рабочего органа узкотраншейной машины

С.Н. Долматов^{1а}, С.Н. Орловский^{2б}, С.-С.Ш. Саая^{3с}

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева, пр. Мира, 82, Красноярск, Россия

² Красноярский государственный аграрный университет, пр. Мира, 90, Красноярск, Россия

³ Тувинский государственный университет, ул. Ленина, 36, Кызыл, Республика Тыва

^а pipinaskus@mail.ru, ^б orlovskiysergey@mail.ru, ^с sai-suu2014@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-1389-5894>, ^б <https://orcid.org/0000-0001-8904-834>,

^с <https://orcid.org/0000-0002-2412-314>

Статья поступила 23.12.2024, принята 06.02.2025

Объектом исследования является траншейная машина, которая предназначена для прокладки траншей в талых грунтах под кабельные коммуникации для строительства дорог и мостов, строительства целевого дренажа, нарезки щелей и блоков в мерзлых грунтах для проведения взрыва или разработки грунта траншеекопателями. Экспериментальную мелиоративную машину можно эксплуатировать круглогодично при температуре окружающего воздуха $\pm 40^\circ\text{C}$. В отличие от других машин она имеет преимущества: мобильна, легка и снабжена бульдозерным оборудованием для выполнения планировочных работ и засыпки траншей. Траншейная машина во многих случаях может с успехом заменить более дорогие и тяжелые экскаваторы. Узкотраншейная машина выполнена в виде навесного и встроенного оборудования к гусеничному трактору и состоит из следующих групп: узкотраншейный рабочий орган, привод рабочего органа, бульдозер, гидросистема, гидроредуктор. В данной статье приведены результаты исследований узкотраншейного землеройного экскаватора и определены его рациональные параметры. Проведены эксперименты в полевых условиях на территории Республики Тыва с закладкой на глубину до 4 м, в вертикальные экраны – на глубину до 10 м и более. Выполнен двухфакторный дисперсионный анализ на исследуемых параметрах мелиоративной машины, исследована взаимосвязь с разрабатываемой средой. Предложен метод оптимизации режимов резания грунта, который позволил создать орудия, агрегатирующиеся с трактором без каких-либо переделок его трансмиссии на период выполнения работ. Это достигнуто минимально возможными значениями энергоемкости прорезания щели и экскавации продуктов резания по критериям скоростей резания и подачи за счет оптимизированных углов установки резцов и их конструктивных особенностей.

Ключевые слова: узкотраншейная машина; рабочий орган; дренаж; конструкция; дисперсионный анализ.

Justification and selection of the main parameters of the working body of a narrow-trench machine

S.N. Dolmatov^{1а}, S.N. Orlovsky^{2б}, S.-S.Sh. Saaya^{3с}

¹ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; 82, Mira Ave., Krasnoyarsk, Russia

² Krasnoyarsk State Agrarian University; 90, Mira Ave., Krasnoyarsk, Russia

³ Tuva State University; 36, Lenin St., Kyzyl, Republic of Tyva

^а pipinaskus@mail.ru, ^б orlovskiysergey@mail.ru, ^с sai-suu2014@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-1389-5894>, ^б <https://orcid.org/0000-0001-8904-834>,

^с <https://orcid.org/0000-0002-2412-314>

Received 23.12.2024, accepted 06.02.2025

The object of the study is a trenching machine that is designed to lay trenches in melt soils for cable communications for the construction of roads and bridges, the construction of slit drainage, cutting cracks and blocks in frozen soils for explosion or developing soil with trenches. An experimental melioration machine can be operated year-round at ambient temperatures $\pm 40^\circ\text{C}$. Unlike other machines, it has the following advantages: it is mobile, lightweight and equipped with bulldozer equipment for planning work and back-filling of trenches. In many cases, a trench machine can successfully replace more expensive and heavy excavators. The narrow-trenching machine is made in the form of mounted and built-in equipment for a tracked tractor and consists of the following groups: narrow-trench working element, working element drive, bulldozer, hydraulic system, hydraulic speed reducer. This article presents the results of studies of a narrow-trenching excavator and defines its rational parameters. Experiments have been conducted in field conditions in the Republic of Tyva with laying to a depth of up to 4 m, in vertical screens - to a depth of up to 10 m and more. A two-factor dispersion analysis has been performed on the studied parameters of the TM-160 melioration machine, the relationship with the developed environment has been studied. A method for optimizing soil cutting modes is proposed, which makes it possible to create tools that are aggregated with a tractor without any alterations to its transmission for the period of work. This is achieved by the minimum possible values of energy intensity for cutting a gap and excavating cutting products according to the criteria of cutting speeds and feed due to optimized cutting angles and their design features.

Keywords: narrow trenching machine, working element, drainage, design, dispersion analysis.

Введение. В гидротехническом строительстве имеются большие объемы работ, связанные с выполнением траншей в грунте. Это строительство трубчатых дренажных водоводов, укладка сыпучих дренажных материалов, устройство «стенок в грунте» из водонепроницаемых материалов, строительство вертикальных плечных экранов. Глубина разрабатываемых траншей зависит от вида гидромелиоративного сооружения. Так, дренаж в основном необходимо закладывать на глубину до 4 м, а вертикальные экраны – на глубину до 10 м и более. Вместе с тем по технико-экономическим соображениям целесообразно разрабатывать траншеи не шире, чем того требуют условия гидромелиоративного производства [1–8].

Существующие траншеекопатели, основные из которых ковшовые и скребковые, имеют рабочие органы и кожухи для подачи строительного материала в виде двух самостоятельно установленных консолей. Это вызывает необходимость обеспечения прочности каждой погруженной в землю консоли и, как следствие, повышения материалоемкости всей конструкции. Кроме того, известные траншеекопатели, имеют ширину рабочих органов, равную ширине разрабатываемого забоя. Это приводит к заклиниванию рабочих органов в грунтовом массиве. Поэтому траншеекопатели известных конструкций не могут выполнять узкие и глубокие траншеи в грунте [9–16].

Объект исследования. Объектом исследования является траншейная машина, которая предназначена для:

- для прокладки траншей в талых грунтах под кабельные коммуникации;
- строительства щелевого дренажа;
- нарезки щелей и блоков в мерзлых грунтах для проведения взрыва или разработки грунта траншеекопателями.

Машину можно эксплуатировать круглогодично при температуре окружающего воздуха $\pm 40^\circ\text{C}$.

Она мобильна, легка и снабжена бульдозерным оборудованием для выполнения планировочных работ и засыпки траншей.

Траншейная машина во многих случаях может с успехом заменить более дорогие и тяжелые экскаваторы [17].

Машина выполнена в виде навесного и встроенного оборудования к гусеничному трактору и состоит из следующих групп:

- узкотраншейный рабочий орган;
- привод рабочего органа;
- бульдозер;
- гидросистема;
- гидрохоодоуменьшитель [18].

Указанное оборудование достаточно просто устанавливается и демонтируется с трактора [19].

Наиболее важным узлом узкотраншейной машины является режущая цепь. На машине ТМ-160 применена режущая цепь наружного зацепления ЦНЗ. Она создана для работы в абразивной среде и наличии динамических нагрузок. Ее долговечность в 2 раза выше серийных цепей, применяемых на траншейных цепных экскаваторах. Она рассчитана:

- на длительную работу без смазки;
- для работы в талых и мерзлых грунтах высокой прочности;
- для работы в условиях повышенной влажности и липкости грунта;
- она устойчива к попаданию камней, строительного мусора и т.п.

Цепи наружного зацепления ЦНЗ могут эффективно применяться на других строительных, дорожных и погрузочных машинах, например, скреперах, элеваторах и т. п. [20].

Для условий гидромелиоративного строительства нами предложен узкотраншейный землеройный рабочий орган, в котором рама совмещена с кожухом для подачи строительного материала. Предложенный рабочий орган содержит кожух (1) с приводным (2) и натяжным (3) колесами, вокруг которых перекинут бесконечный режущий трос (4) с грунтообрабатывающими ножами (5). В задней части кожуха (1) имеется полость (6) для подачи строительного материала в грунтовую щель, отрываемую ножами. Последовательно закрепленные на тросе (4) ножи (5) имеют криволинейные отвальные поверхности, наклоненные в противоположные стороны. Поэтому при взаимодействии двух соседних ножей (5) с грунтовым массивом ножи поворачиваются в противоположные стороны, скручивая участок троса между ними и увеличивая ширину разрабатываемого забоя. Опорный желоб в передней части кожуха служит для ограничения поворота ножей (5) (рис. 1).

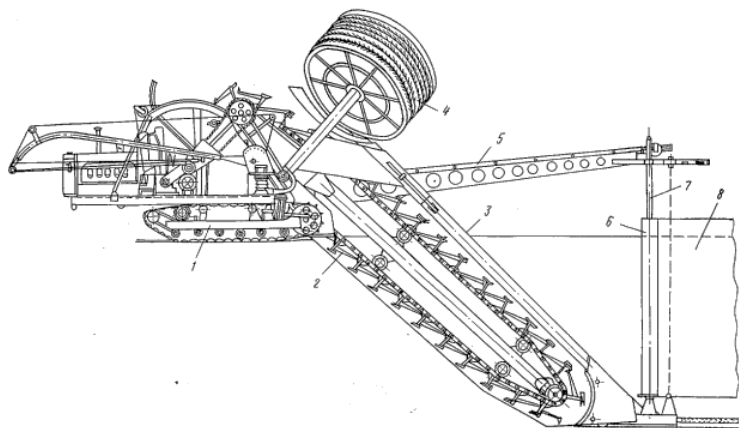


Рис. 1. Узкотраншейный землеройный рабочий орган

Методы и методика исследования. Из условия минимальных потерь мощности привода на преодоление сил трения боковых ребер ножей и винтовых зажимов крепления ножей о направляющие поверхности кожуха предлагается выбирать оптимальный режим работы устройства, используя следующую целевую функцию:

$$2 \sum_{i=1}^n C_i \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{2 \cdot t} \sin \Theta_1 \sin \Theta_2 - n R_n \sin \Theta_1 \cos \Theta_2 + \frac{2 C_0 \Theta_0}{l_p \cdot t} \rightarrow \min \quad (1)$$

при обеспечивающих работоспособность устройства ограничениях:

$$1. \quad 2 C_0 \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{r \cdot t} \sin \Theta_1 \sin \Theta_2 - R_n \sin \Theta_1 \cos \Theta_2 \geq 0$$

условие безотрывного скольжения винтовых зажимов по поверхности желоба:

$$2. \quad R_r - \frac{C_n (\Theta_1 - \Theta_0)}{r \cdot t} \geq 0$$

условие достижения необходимого угла отклонения ножей действием реакции силы резания, где n – число ножей одновременно находящихся в забое; C_0 , C_i , C_n – крутильные характеристики троса соответственно в нижней точке забоя, в месте крепления i -го ножа, в верхней точке забоя, $H^* m^2$ (°); Θ_1 – угол необходимого поворота ножа в забое, °; Θ_0 – начальный угол установки ножа, °; t – расстояние между соседними ножами, м; $r \Theta_1$ – радиус и угол поворота вокруг оси троса точки приложения к ножу реакции силы резания грунта, м, °; R_n R_t – нормальная и тангенциальная составляющие реакции силы резания грунта ножом; l_p – длина трущегося ребра ножа, м.

Результаты исследования и их обсуждение. Для каждой подсистемы за время указанных периодов цикла составлены уравнения, которые имеют следующий вид:

– для большого контура системы

$$\Theta_{\text{бк}} \tau_{\text{бк}} = c_1 G_{\text{жс.бк}} (t_2 - t_1) + c_2 G_{\text{мет.бк}} (t_{2\text{см}} - t_{1\text{см}}) + k_{\text{бк}} F_{\text{бк}} (t'_{\text{см}} - t_{\text{ос}}) \tau_{\text{бк}} \quad (2)$$

– для малого контура

$$\Theta_{\text{мк}} \tau_{\text{мк}} = c_1 G_{\text{жс.бк}} (t_3 - t_2) + c_2 G_{\text{мет.бк}} (t_{3\text{см}} - t_{1\text{см}}) + k_{\text{мк}} F_{\text{мк}} (t'_{\text{см}} - t_{\text{ос}}) \tau_{\text{мк}} \quad (3)$$

– для подсистемы

$$c_1 G_{\text{жс}2} t_2 + c_2 G_{\text{мет.}2} t_{2\text{см}} = c_1 G_{\text{жс}2} t_2' + c_2 G_{\text{мет.}2} t_{2\text{см}}' + \kappa_2 - F_2 (t_{\text{см}}''' - t_{\text{ос}}) \tau_{\text{мк}} \quad (4)$$

где индексы бк, мк, г – большой и малый контур, подсистема угла отклонения ножей; $G_{\text{ж}}$, $G_{\text{мет}}$ – количество ножей в цепи; t_1 , t_2 , t_3 – расстояние между ножами.

Решив уравнение (2), (3), (4) относительно t_3 и t_2 , рассчитываем расстояние от верхней точки до нижней точки в рабочем органе $G_{\text{жмк}}$ и $G_{\text{жг}}$.

Подставив в формулу (4) значения t^3 и $t^{2/}$, а также произведя соответствующие замены, получаем выражение:

$$t_4 = \frac{\Theta_{\text{мк}} \tau_{\text{мк}} \tau_{\text{мк}}}{m_{\text{мк}} + q_{\text{мк}} \tau_{\text{мк}}} + \frac{\Theta_{\text{бк}} B_{\text{бк}} \tau_{\text{бк}}}{m_{\text{бк}} + q_{\text{бк}} \tau_{\text{бк}}} + t_1 M_{\text{бк}} B_{\text{бк}} + t_{\text{ос}} (c_{\text{бк}} + A_{\text{бк}} B_{\text{бк}}) \quad (5)$$

$$\Gamma_i = \frac{G_{\text{жс}i}}{G_{\text{жсбк}}} \quad (6)$$

$$m_i = c_1 G_{\text{жс}i} + c_2 G_{\text{жс}i} \frac{k_i}{a_{2i}} \quad (7)$$

a_{2i} – коэффициент экскавации от i -ой оси;

$$q_i \tau_i = \Theta_i''' \frac{k_i}{2a_i} \quad (8)$$

$$\Theta_i''' = k_i F_i \tau_i \quad (9)$$

$$A_i = \frac{\Theta_i''' \frac{k_i}{a_{2i}}}{m_i + \Theta_i''' \frac{k_i}{2a_{2i}}} \quad (10)$$

$$M_i = \frac{m_i - \Theta_i''' \frac{k_i}{2a_{2i}}}{m_i + \Theta_i''' \frac{k_i}{2a_{2i}}} \quad (11)$$

$$B_{\text{бк}} = M_{\text{бк}} \Gamma_{\text{мк}} + M_{\text{г}} \Gamma_{\text{г}} \quad (12)$$

$$C_{\text{бк}} = A_{\text{мк}} \Gamma_{\text{мк}} + A_{\text{г}} \Gamma_{\text{г}} \quad (13)$$

Для представления зависимости экскавации в общем виде используем уравнение Лангранжа:

$$f'(c) = \frac{f(b) - f(a)}{b - a} \quad (14)$$

согласно которому

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{t_4 - t_1}{\tau_{\text{и}}} \quad (15)$$

После подстановки значения t_4 уравнение (15) имеет вид:

$$\frac{dt}{d\tau} = \left[\frac{\Theta_{\text{МК}} \Gamma_{\text{МК}} \tau_{\text{МК}}}{m_{\text{МК}} + q_{\text{МК}} \tau_{\text{МК}}} + \frac{\Theta_{\text{ОК}} B_{\text{ОК}} \tau_{\text{ОК}}}{m_{\text{ОК}} + q_{\text{ОК}} \tau_{\text{ОК}}} + \right] \frac{n}{\tau} \quad (16)$$

Умножив обе части уравнения на $d\tau$, раскрыв скобки и подставив значения $\tau_{\text{ОК}} = \frac{\tau}{n} * k$ и $\tau_{\text{МК}} = \frac{\tau}{n} * k$ (1-к), получим выражение:

$$dt = \frac{\Theta_{\text{МК}} \Gamma_{\text{МК}} (1-k) d\tau}{m_{\text{МК}} + q_{\text{МК}} \frac{\tau}{n} (1-k)} + \frac{\Theta_{\text{ОК}} B_{\text{ОК}} k d\tau}{m_{\text{ОК}} + q_{\text{ОК}} \frac{\tau}{n} k} + t_1 (M_{\text{ОК}} B_{\text{ОК}} - 1) n \frac{d\tau}{\tau} + t_{\text{ОС}} (C_{\text{ОК}} + A_{\text{ОК}} B_{\text{ОК}}) n \frac{d\tau}{\tau}, \quad (17)$$

где k – коэффициент использования по времени. Далее интегрируя:

$$\int dt = (1-k) \Theta_{\text{МК}} \Gamma_{\text{МК}} \int \frac{d\tau}{m_{\text{МК}} + q_{\text{МК}} \frac{\tau}{n} (1-k)} + k B_{\text{ОК}} \Theta_{\text{ОК}} \int \frac{d\tau}{m_{\text{ОК}} + q_{\text{ОК}} \frac{\tau}{n} k} + t_1 (M_{\text{ОК}} B_{\text{ОК}} - 1) n \times \int \frac{d\tau}{\tau} + t_{\text{ОС}} (C_{\text{ОК}} + A_{\text{ОК}} B_{\text{ОК}}) n \int \frac{d\tau}{\tau} \quad (18)$$

получим:

$$t = \frac{\Theta_{\text{МК}} \Gamma_{\text{МК}} N}{q} \ln \left(m_{\text{МК}} + \frac{q_{\text{МК}} (1-k)}{n} \right) + \frac{\Theta_{\text{ОК}} B_{\text{ОК}} n}{q_{\text{ОК}}} \times \ln \left(m_{\text{ОК}} + \frac{q_{\text{ОК}} k}{n} \tau \right) + t_1 (M_{\text{ОК}} B_{\text{ОК}} - 1) n \ln \tau +$$

$$+ t_{\text{ОС}} (C_{\text{ОК}} + A_{\text{ОК}} B_{\text{ОК}}) \times n \ln \tau + c \quad (19)$$

Подставив это выражение в зависимость (18), упростив ее, получим окончательное выражение экскавации грунта с данными резцами:

$$t = \underbrace{\frac{\Theta_{\text{МК}} \Gamma_{\text{МК}} n}{q_{\text{МК}}} \ln \left(1 + \frac{q_{\text{МК}} (1-k)}{m_{\text{МК}} n} \tau \right)}_{t_1} + \underbrace{\frac{\Theta_{\text{ОК}} B_{\text{ОК}} n}{q_{\text{ОК}}} \times \ln \left(1 + \frac{k q_{\text{ОК}}}{m_{\text{ОК}} n} \tau \right)}_{t_{11}} + \underbrace{t_1 (M_{\text{ОК}} B_{\text{ОК}} - 1) n \ln \tau}_{t_{111}} + \underbrace{t_{\text{ОС}} (C_{\text{ОК}} + A_{\text{ОК}} B_{\text{ОК}}) \times n \ln \tau}_{t_{1V}} \quad (20)$$

Таким образом, согласно зависимости (20), находим нормальное распределение энергоемкости проектируемого орудия. Их анализ по результатам многочисленных расчетов показывает, что в значительных случаях $t_i > t_{ii}$, t_{ii} достигает больших значений только при длительной работе прорезания грунта, т. е. с увеличением коэффициента k . Величина составляющей t_{ii} зачастую с небольшим отклонением колеблется около значения начального процесса t_i и увеличивается с повышением величин коэффициентов k_i . Слагаемое t_{1V} при малых значениях коэффициентов и площадей срезаемой стружки грунта не оказывает заметного влияния на величину $t_{\text{рж}}$, увеличиваясь с их повышением.

Экспериментальная проверка зависимости полной экскавации грунта, показала соответствующие параметры и эффективность более чем экспериментальные в среднем до 10 %. В табл. 1 представлены результаты расчетов однофакторного дисперсионного анализа экскавации грунта исследуемого рабочего органа.

Таблица 1. Результаты расчетов однофакторного дисперсионного анализа экскавации грунта исследуемого рабочего органа

Показатель	Расчетная поступательная скорость V_d , м/с		
Счет	13	13	26
Сумма	5677,2	17315,95	22993,15
Среднее	436,7077	1331,996	884,3519
Дисперсия	782037,2	20512509	10429783
ИТОГИ	0,1	8000	Итого

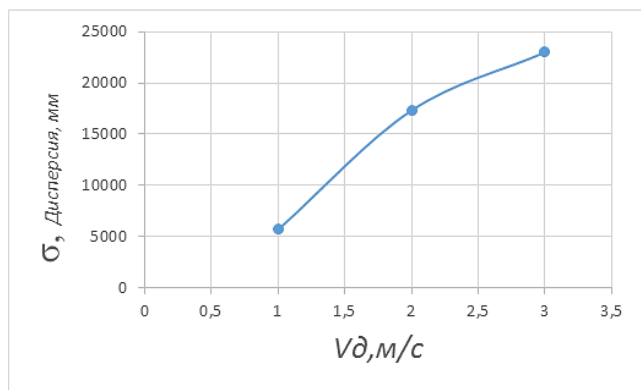


Рис. 2. График зависимости мощности привода на преодоление сил трения

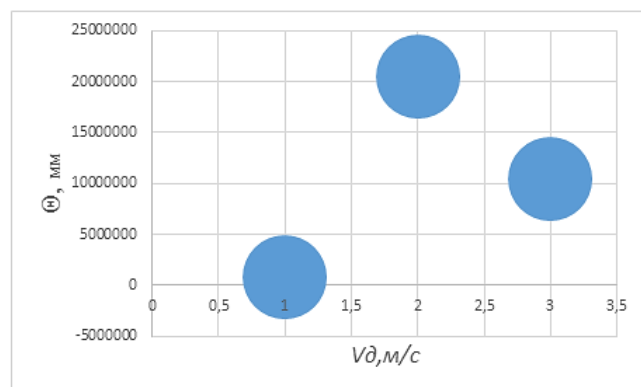


Рис. 3. Логарифмически нормальное распределение энергоемкости проектируемого

Конструктивные особенности нового землеройного рабочего органа позволяют значительно повысить качество выполнения прокладки дренажа, траншей в грунте, в том числе увеличить глубину разрабатываемых траншей, снизить металлоемкость и энергоем-

кость оборудования. Закрепленные на тросе ножи способны перерезать погребенную древесину и известняковые породы.

Заключение. На основании анализа и экспериментальной проверки, предлагаемой для расчета полной экскавации зависимости, можно сделать вывод о ее достаточной сходимости с процессом.

Однофакторный эксперимент установил, что результаты зависимостей полной экскавации грунта эффективнее более чем на 10 % базовой машины.

Дисперсионный анализ показывает, что выбранные параметры соответствуют ожиданию, таким образом, выработка экскавации грунта не зависит от технологических процессов.

Конструктивно узкотраншейная машина аналогична БМРМГ, но отличается измененным передаточным числом редуктора, усиленной рамой, наличием опорной лыжи и применением твердосплавных резцов со свободным характером резания. Глубина прорезаемой щели 0,6 м, ширина 0,07 м, рабочая скорость 0,33–0,36 км/ч, скорость резания 3,75 м/с, масса орудия 1200 кг [1]. Решение задачи оптимизации режимов резания грунта позволило создать орудия, которые агрегируются с трактором без каких-либо переделок его трансмиссии на период выполнения работ. Это достигнуто минимально возможными значениями энергоемкости прорезания щели и экскавации продуктов резания по критериям скоростей резания и подачи за счет оптимизированных углов установки резцов и их конструктивных особенностей.

Представленная в статье методика обоснования и выбора оптимальных параметров рабочего органа узкотраншейной машины дает возможность определять эффективные параметры агрегата и в дальнейшем может быть применена на стадии проектирования траншейных машин для строительства дорог, мостов и прокладки осушительных сетей.

Литература

- Басалаев С.Е. Эффективность применения траншейной машины с дополнительной оснасткой // Избр. докл. 70-й Юбилейной университетской науч.-технич. конф. студентов и молодых ученых: Мат-лы конф., Томск, 18 апреля 2024 г. Томск: Изд-во Томск. гос. архитектурно-строит. ун-та, 2024. С. 276-278. EDN USOFMG.
- Саая С.-С.Ш., Монгуш С.Ч., Чылбак А.А., Войнаш С.А., Теплов А.В. Исследование динамических качеств системы поддрессирования лесохозяйственного трактора // Изв. Тульского гос. ун-та. Сер. Технические науки. 2024. № 2. С. 546-548. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-2-546-547. EDN RXEBID
- Карнаухов А.И. К вопросу обеспечения энергосбережения при работе лесопожарных агрегатов // Технологии и оборудование садово-паркового и ландшафтного строительства: сб. статей Всеросс. науч.-практич. конф., Красноярск, 20 декабря 2018 г. Красноярск: Изд-во Сиб. гос. ун-та науки и технологий, 2019. С. 410-414. EDN ZCNOKD.
- Коржов Д.С. Оптимизация массы ротора произвольной структуры // 3D технологии в решении научно-практических задач: сб. статей Всеросс. науч.-практич. конф., Красноярск, 23 мая 2023 г. Красноярск: Изд-во Сиб. гос. ун-та науки и технологий, 2023. С. 41-45. EDN DMIXIP.
- Коршун В.Н. Новая концепция лесохозяйственного трактора // Инновационные механизмы решения проблем научного развития: сб. статей Междунар. науч.-практич. конф., Оренбург, 04 марта 2019 г. Оренбург: ООО "ОМЕГА САЙНС", 2019. С. 53-57. EDN YYLBJR.
- Коршун В.Н. Интенсификация рабочих процессов обработки почвы // Междисциплинарность научных исследований как фактор инновационного развития: сб. статей Междунар. науч.-практич. конф., Екатеринбург, 19 апреля 2020 г. Уфа: ООО "ОМЕГА САЙНС", 2020. С. 68-71. EDN UNEWDX.
- Котлобай А.Я. Формирование направлений моднизации землеройных машин // Наука и техника. 2013. № 5. С. 54-59. EDN TGGWSD.
- Литвинова М. М. Сравнение транспортных систем в лесозаготовительной промышленности // Машиностроение: новые концепции и технологии: Мат-лы Всеросс. науч.-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Красноярск, 23 октября 2020 г. Красноярск: Изд-во Сиб. гос. ун-та науки и технологий, 2020. С. 114-117. EDN WTSOYM.

References

9. Мажугин Е.И. Мелиоративные машины. Машины для строительства гидромелиоративных систем: курс лекций. Горки: Белорусс. гос. сельскохоз. академия, 2015. 140 с. ISBN 978-985-467-575-6. EDN URUFQJ.
10. Саая С.-С.Ш., Орловский С.С.Ш., Долматов С.Н., Карнаухов А.И. Обоснование параметров элементов поддрессирования лесохозяйственного трактора на основе анализа его динамических качеств // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 2(62). С. 34-39. DOI:10.18324/2077-5415-2024-2-34-39. EDN TLUMUQ.
11. Орловский С.Н. Обоснование параметров упругой характеристики полуси гусеничного лесохозяйственного трактора // Хвойные бореальной зоны. 2024. Т. 42, № 5. С. 43-48. DOI:10.53374/1993-0135-2024-5-43-48. EDN QNIYYD.
12. Пунинский В. С. Исследование процессов извлечения скрытых камней из почвы рабочим оборудованием мелиоративных машин // Проблемы устойчивого развития мелиорации и рационального природопользования: Мат-лы юбилейной междунар. науч.-практич. конф. (Костяковские чтения), Москва, 10–11 апреля 2007 г. Т. II. М.: Изд-во Всеросс. науч.-исслед. ин-та автоматизации, 2007. С. 319-322. EDN YLAAPT.
13. Чабуткин Е.К. Расчет элементов конструкции и технологических параметров строительных, дорожных и мелиоративных машин: уч. пособие. Ярославль: М-во образования и науки РФ, Изд-во Ярослав. гос. технич. ун-та, 2010. 71 с. ISBN 978-5-9914-0138-8. EDN QNOUVF.
14. Тимофеев А.М. Разработка методики расчета эксплуатационных затрат парка строительных и мелиоративных машин с учетом показателей надежности машин // Природообустройство. 2013. № 1. С. 86-88. EDN PWVBQJ.
15. Устинов А.В. Способы повышения производительности строительного-дорожного машин на примере траншейных экскаваторов. Томск: Томск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2014. 144 с. ISBN 978-5-93057-595-8. EDN TIFEKN.
16. Хайбуллин Р.Р. Анализ математической модели системы «рабочий орган землеройной машины – траншейный фундамент» // Автоматика. Информатика. 2008. № 1-2(22-23). С. 33-35. EDN QZAQGL.
17. Шпагин Д.Е. Моделирование поверхности движения лесных машин // Актуальные проблемы науки и техники: Сб. статей по мат-лам междунар. науч.-практич. конф., Уфа, 24 января 2020 г. – Уфа: ООО «Научно-издательский центр "Вестник науки"», 2020. С. 46-51. EDN BVJUBJ.
18. Шпагин Д.Е. Проектирование параметров подвески транспортной машины // Машиностроение: новые концепции и технологии: Мат-лы Всеросс. науч.-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Красноярск, 23 октября 2020 г. Красноярск: Изд-во Сиб. гос. ун-та науки и технологий, 2020. С. 221-225. EDN EPULPM.
19. Dobretsov R., Kalimullin M., Karnaukhov A., Voinash S., Kiyamov I., Sabitov L. Power distribution mechanisms with friction control in the transmission of a road train with an active trailer-dissolution // E3s web of conferences: IX International Conference on Advanced Agritechologies, Environmental Engineering and Sustainable Development, Namanagan, Uzbekistan, 26 октября – 03 ноября 2023 г. Vol. 486. EDP Sciences – Web of Conferences: EDP Sciences – Web of Conferences, 2024. P. 07012. DOI: 10.1051/e3sconf/202448607012. EDN LZSYR.
20. Tarasenko B., Kusa Kh., Dzasheev A.M., Karnaukhov A., Tihonov E., Sokolova V., Babaev Sh. Upgraded rotary harrow for vineyards // E3s web of conferences: VIII International Conference on Advanced Agritechologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-VIII 2023), Krasnoyarsk, 29–31 марта 2023 г. Vol. 390. EDP Sciences: EDP Sciences, 2023. P. 06005. DOI 10.1051/e3sconf/202339006005. EDN PRHEVG.
21. Basalaev S.E. Efficiency of trenching machine application with additional equipment // Selected papers of the 70th Anniversary University Scientific and Technical Conference students and young scientists: Proceedings of the conference, Tomsk, April 18, 2024 Tomsk: Publishing House of Tomsk State Architecture and Civil Engineering University, 2024. P. 276-278. EDN USOFMG.
22. Saaya S.-S.S., Mongush S.C., Chylbak A.A., Voynash S.A., Teppoev A.V. Investigation of the dynamic qualities of the forestry tractor suspension system // Izvestia Tula State University. Series of Technical Sciences. 2024. № 2. P. 546-548. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-2-546-547. EDN RXEBID.
23. Karnaukhov A.I. To the issue of energy conservation in the operation of forest fire units // Technologies and equipment of garden and landscape construction: a collection of articles of the All-Russian scientific-practical conference, Krasnoyarsk, December 2018 г. Krasnoyarsk: Publishing house of the Siberian State University of Science and Technology, 2019. P. 410-414. EDN ZCNOKD.
24. Korzhov D.S. Optimization of the rotor mass of arbitrary structure // 3D technologies in solving scientific and practical problems: collection of articles of the All-Russian scientific and practical conference, Krasnoyarsk, May 23, 2023 Krasnoyarsk: Publishing house of the Siberian State University of Science and Technology, 2023. P. 41-45. EDN DMIXIP.
25. Korshun V.N. New concept of forestry tractor // Innovative mechanisms for solving problems of scientific development: collection of articles Intern. scientific and practical conference, Orenburg, March 04, 2019 Orenburg: LLC «OMEGA SAINS», 2019. P. 53-57. EDN YYLBJR.
26. Korshun V.N. Intensification of working processes of soil cultivation // Interdisciplinarity of scientific research as a factor of innovative development: collection of articles of the Intern. scientific-practical conference, Yekaterinburg, April 19, 2020. Ufa: LLC «OMEGA SAINS», 2020. P. 68-71. EDN UNEWDX.
27. Kotlobai A.Ya. Formation of directions of modernization of earth-moving machines // Science and technology. 2013. № 5. P. 54-59. EDN TGGWSD.
28. Litvinova M. M. Comparison of transport systems in the logging industry // Machine Building: New Concepts and Technologies: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, Krasnoyarsk, October 23, 2020. Krasnoyarsk: Publishing house of the Siberian State University of Science and Technology, 2020. P. 114-117. EDN WTSOYM.
29. Mazhugin E.I. Ameliorative machines. Machines for the construction of hydromeliorative systems: a course of lectures. Gorki: Belarusian State Agricultural Academy, 2015. 140 p. ISBN 978-985-467-575-6. EDN URUFQJ.
30. Saaya S.-S.S., Orlovsky S.S.S., Dolmatov S.N., Karnaukhov A.I. Justification of the parameters of the forestry tractor underderride elements based on the analysis of its dynamic qualities // Systems. Methods. Technologies. 2024. № 2(62). P. 34-39. DOI:10.18324/2077-5415-2024-2-34-39. EDN TLUMUQ.
31. Orlovskiy S.N. Justification of the parameters of the elastic characteristic of the half axle of the caterpillar forestry tractor // Conifers of the boreal zone. 2024. Vol. 42, № 5. P. 43-48. DOI:10.53374/1993-0135-2024-5-43-48. EDN QNIYYD.
32. Puninsky V.S. Investigation of the processes of the hidden stones extraction from the soil by the working equipment of meliorative machines // Problems of sustainable development of land reclamation and rational nature management: Proceedings of the jubilee international scientific-practical conference (Kostyakov readings), Moscow, April 10-11, 2007, Vol. II. M.: Publishing house of All-Russian scientific-research institute of automatics, 2007. P. 319-322. EDN YLAAPT.

13. Chabutkin E.K. Calculation of design elements and technological parameters of construction, road and land reclamation machines: textbook. Yaroslavl: Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Publishing House of Yaroslavl State Technical University, 2010. 71 p. ISBN 978-5-9914-0138-8. EDN QNOUVF.
14. Timofeev A.M. Development of a methodology for calculating the operating costs of the fleet of construction and land reclamation machines taking into account the reliability indicators of machines // *Prorodobuestroystvo*. 2013. № 1. P. 86-88. EDN PWVBQJ.
15. Ustinov A.V. Ways to increase productivity of construction-road machines by the example of trench excavators. Tomsk: Publishing house of Tomsk State Architectural and Civil Engineering University, 2014. 144 p. ISBN 978-5-93057-595-8. EDN TIFEKN.
16. Khaibullin P.P. Analysis of the mathematical model of the system «the working body of the earth-moving machine - trench foundation» // *Avtomatika. Informatics*. 2008. № 1-2(22-23). P. 33-35. EDN QZAQGL.
17. Shpagin D.E. Modeling of the motion surface of forest machines // *Actual problems of science and technology: Collection of articles on the materials of the international scientific-practical conference, Ufa, January 24, 2020*. - Ufa: LLC Scientific and Publishing Center «Vestnik nauki», 2020. P. 46-51. EDN BVJUBJ.
18. Shpagin D.E. Designing the parameters of the suspension of the transport machine // *Machine Building: New Concepts and Technologies: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, Krasnoyarsk, October 23, 2020*. Krasnoyarsk: Publishing house of the Siberian State University of Science and Technology, 2020. P. 221-225. EDN EPULPM.
19. Dobretsov R., Kalimullin M., Karnaukhov A., Voinash S., Kiyamov I., Sabitov L. Power distribution mechanisms with friction control in the transmission of a road train with an active trailer-dissolution // *E3s web of conferences: IX International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development, Namanagan, Uzbekistan, October 26 - November 03, 2023 Vol. 486*. EDP Sciences - Web of Conferences: EDP Sciences - Web of Conferences, 2024. P. 07012. DOI: 10.1051/e3sconf/202448607012. EDN LZSYR.
20. Tarasenko B., Kusa Kh., Dzjasheev A.M., Karnaukhov A., Tihonov E., Sokolova V., Babaev Sh. Upgraded rotary harrow for vineyards // *E3s web of conferences: VIII International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-VIII 2023), Krasnoyarsk, March 29-31, 2023 Vol. 390*. EDN PRHEVG.