

Экспериментальное исследование технологических режимов резания торфов дискофрезерным рабочим органом

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

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

² Тувинский государственный университет, ул. Ленина, 36, Кызыл, Республика Тыва

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

^а <https://orcid.org/0000-0001-8904-834>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-2412-314>

Статья поступила 15.08.2024, принята 20.09.2024

В статье обоснована рациональная система осушения, состоящая из разреженной сети открытых канав в сочетании с целевым дренажем. Согласно агротехническим требованиям, на целевой дренаж были выбраны щелерезные машины с баровым, цепным и дискофрезерным рабочим органом, которые могут применяться как на талых, так и на промерзших торфах с невысокой пнистостью и наличием захороненной древесины. Приведены результаты оптимизации режимов резания дискофрезерным рабочим органом в СибНИИГиМ на базе применяемой в торфяной промышленности щеледренажной машины МДМ-2. Была создана экспериментальная установка, позволяющая получить скорости движения 0,32–0,61 км/ч, скорости резания 2,97–24 м/с и возможность монтажа на фрезерный диск режущих элементов различных геометрических форм. На агрегируемом с установкой тракторе ДТ-75Б был смонтирован комплект тензоизмерительной аппаратуры, обеспечивающий работу агрегата в производственных условиях без ограничений. Также определена сходимость результатов при испытаниях данных посредством считывания кривых, характеризующих процесс, с осциллограмм посредством прибора Ф-001 с кодированием информации в двоичной системе. Обработка производилась по разработанной в лаборатории по программе «ФООН» с получением значений статистик распределения рассматриваемых величин, коэффициентов загрузки двигателя, динамики процесса и времени перегрузок по крутящему моменту от его среднего, длительно наблюдаемого значения. Даны рекомендации для определения оптимальных геометрических параметров и режимов резания фрез на стадии проектирования, которые обеспечивают снижение энергоемкости процесса в 1,25–2,3 и 3 раза как на талых, так и на промерзших торфах.

Ключевые слова: болота; дренаж; машины; рабочие органы; резцы; энергоемкость.

Experimental study of technological modes for cutting peat with a disc-milling working body

S.N. Orlovskiy^{1а}, S.-S.Sh. Saaya^{2б}

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

² Tuvan State University; 36, Lenin St., Kyzyl, Republic of Tyva

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

^а <https://orcid.org/0000-0001-8904-834>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-2412-314>

Received 15.08.2024, accepted 20.09.2024

This paper substantiates a rational drainage system consisting of a sparse network of open ditches in combination with slot drainage. According to agrotechnical requirements for slot drainage, slot-cutting machines with bar, chain and disk-milling working tools are selected, which can be used both on thawed and frozen peat soils with low stump content and presence of buried wood. The results of optimization of cutting modes by disk-milling working organ in SibNIIGiM on the basis of slit-drainage machine MDM-2 used in peat industry are given. An experimental unit is created, which allows to obtain speeds of 0.32 - 0.61 km/h, cutting speeds of 2.97 - 24 m/s and the possibility of mounting on the milling disk of cutting elements of various geometric shapes. A set of strain-measuring equipment is mounted on the DT-75B tractor attached to the unit, ensuring operation of the unit in production conditions without restrictions. The convergence of results when testing data is also determined by reading curves characterizing the process from oscillograms using the F-001 device with information encoding in a binary system. Processing is carried out according to the "UNF" program developed in the laboratory with the obtaining of statistical values for the distribution of the quantities under consideration, engine load factors, process dynamics and torque overload time from its average, long-term observed value. Recommendations are given for determining the optimal geometric parameters and cutting modes of milling cutters at the design stage, which ensure a reduction in the energy intensity of the process by 1.25–2.3 and 3 times on both thawed and frozen peats.

Keywords: swamps; drainage; machines; working bodies; cutters; energy intensity.

Введение. Осушение болот с мощным слоем торфа производится, согласно проектам, сетью открытых картовых канав, закладываемых через 60–100 м. Однако такая технологическая схема осушения не

обеспечивает достижения оптимальной влажности в корнеобитаемом слое. В весенний период, на который приходится 85 % годового стока, надмерзлотный верхний слой торфа сильно переувлажняется. Застой воды в микропонижениях приводит к вымоканию посевов трав [1].

Убинской опытно-мелиоративной станцией (УОМС) СибНИИГиМ и ВНИИГиМ совместно была разработана система осушения, состоящая из разреженной сети открытых каналов в сочетании с щелевым дренажем.

Осушение территорий, имеющих повышенную увлажненность, или гидролесомелиорация, с одной стороны, достаточно несложный процесс, но фактические результаты его применения в виде повышения продуктивности древостоев достигаются через десятки лет. Современное лесное хозяйство РФ практически не занимается этими вопросами, хотя накоплен значительный опыт времен СССР в этой области. На подготовленных, осушенных территориях выросли древостои, которые успешно эксплуатируются в настоящее время. Сокращение заболоченных территорий повышает качество жизни населения, создает предпосылки для развития дорожно-транспортных сетей, что, в свою очередь, еще больше способствует освоению территорий, повышению инвестиционной привлекательности, стимулированию развития лесозаготовительного и промышленного производства, туризма.

Весьма показателен в области лесной мелиорации опыт Финляндии. Лесная промышленность является основой национальной экономики Финляндии. Осушение лесов играет важную роль в национальной лесной политике. Начиная с 1960-х гг. в Финляндии ежегодно осушается не менее 200 тыс. га лесной площади.

В Финляндии осушение торфяников сильно изменило леса с XIX в. Основная цель этой обширной дренажной деятельности заключалась в ускорении роста лесов путем направления избыточной воды из влажных почв в ручьи и озера.

В Финляндии пик осушения земель пришелся на 1970–80-е гг. и практиковался до 1997 г., когда закон Финляндии о лесах запретил дальнейшее осушение земель. В настоящее время разрешено только обслуживание старых дренажных сетей. К 1997 г. около 50 % всей площади нетронутых торфяников Финляндии подверглось воздействию дренажных работ, что привело к существенному исчезновению болот. На текущий момент только 10 % площади поверхности покрыто водными экосистемами. Широчайшее применение мелиорации позволило Финляндии выйти в десятку мировых лидеров в области лесозаготовки и лесопереработки. Каждый гектар лесной площади РФ дает всего 0,45 м³ древесины. Для сравнения, в США этот показатель равен 1,04 м³, в Финляндии — 2,72 м³. Промышленное освоение лесных территорий Финляндии, технологии лесной мелиорации позволили буквально за 50 лет создать эффективную лесную промышленность, имеющую широкую сеть лесных дорог, что обеспечивает возможность как эффективной лесоэксплуатации, так и проведения

лесохозяйственных работ, борьбы с пожарами. Плотность сети лесных дорог в Финляндии составляет 12,3 км на 1 тыс. га лесных земель.

Для сравнения, в России это показатель составляет 1,46 км на 1 тыс. га лесных земель, или в 8,4 раз меньше.

Обеспечение максимально эффективного использования ресурсного потенциала лесных территорий является важнейшей задачей для повышения эффективности экономики. И для этого необходима транспортная доступность лесных территорий. Болота и переувлажненные территории, несомненно, являются серьезным препятствием при строительстве дорог.

Нормативная база России одержит федеральный закон от 10 января 1996 г. № 4 ФЗ «О мелиорации земель». Закон содержит требования относительно базовых предпосылок и правил проведения мелиоративных работ.

В общем виде технология осушения лесных заболоченных земель представляет собой систему дрен определенной глубины.

Система обеспечивает отвод избыточных вод с поверхности почвы и из корнеобитаемого слоя, что позволяет увеличить период вегетации сельскохозяйственных культур на дренированных участках.

Производственное применение щелевого дренажа торфяников началось в 1939 г. после создания дренажно-дисковых машин ДДМ-4, ДДМ-5 и дренажно-винтовой ДВМ [2; 3]. В условиях Сибири опыты по щелевому дренажу ведутся с 1949 г. Однако применение щелевого дренажа не расширяется ввиду отсутствия специальных современных щеледренажных машин высокой производительности.

В наибольшей степени агротехническим требованиям на щелевой дренаж удовлетворяют щелерезные машины с баровым, цепным и дискофрезерным рабочим органом, которые могут применяться как на талых, так и на промерзших торфах с невысокой пнистостью и наличием захороненной древесины.

Однако множество вопросов как технологии применения, так и самого оборудования для щелевого дренажа требуют проведения дополнительных исследований.

При выполнении технологического процесса прорезания щелей в торфяной залежи, где рабочий орган встречается с пнями, корнями, валежом и захороненной древесиной, щелерезный агрегат постоянно преодолевает участки повышенной нагрузки, имеющие различные характеристики по амплитудам моментов сопротивления на рабочем органе и длительностям их преодоления. Агрегат в процессе работы представляет собой механическую систему «энергетическое средство + орудие + внешняя среда», между элементами которой существует физическая связь.

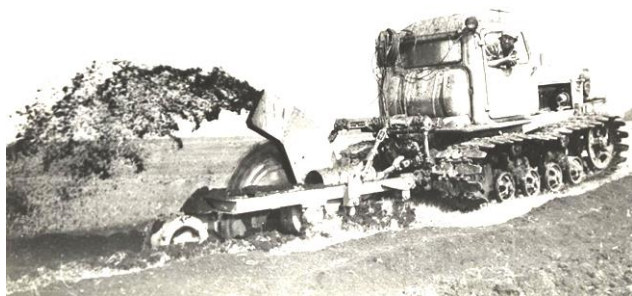


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования технологических режимов резания торфа конструкции СибНИИГиМ

Объекты и методы исследования. С целью исследования технологических режимов резания дискофрезерным рабочим органом в СибНИИГиМ на базе применяемой в торфяной промышленности щеледренажной машины МДМ-2 была создана экспериментальная установка, позволяющая получить скорости движения 0,32–0,61 км/ч, скорости резания 2,97–24 м/с и возможность монтажа на фрезерный диск режущих элементов различных геометрических форм (рис. 1). На агрегатируемом с установкой тракторе ДТ-75Б был смонтирован комплект тензоизмерительной аппаратуры, обеспечивающий работу агрегата в производственных условиях без ограничений.

В процессе испытаний на осциллограмму фиксировались следующие параметры: крутящий момент на валу привода рабочего органа, частота вращения фрезерного диска, частота вращения ведущих звездочек гусениц трактора, тяговое сопротивление машины. Проводилось определение состава торфа, толщины его слоя, твердости, влажности [4].

При испытаниях на фрезерный диск монтировались резы, имеющие заблокированный, полублокированный и свободный характер резания. Дрены глубиной 0,6 м и шириной 0,05–0,16 м прокладывались на участках с различной мощностью слоя торфа и при различной глубине его промерзания. Сравнительным показателем энергетической оценки машины являлась полезная энергоёмкость прорезания щелевой дрены $E_{пол}$, определяемая по выражению:

$$E_{пол} = \frac{N \text{ кВт} \cdot \text{ч}}{Q \text{ м}^3} \quad (1)$$

где N — мощность на привод рабочего органа, кВт; Q — производительность агрегата, м³/ч.

Обработка полученных при испытаниях данных производилась посредством считывания кривых, характеризующих процесс, с осциллограмм посредством прибора Ф-001 с кодированием информации в двоичной системе. Дальнейшая обработка производилась по разработанной в лаборатории программе «ФООН» с получением значений статистик распределения рассматриваемых величин, коэффициентов загрузки двигателя, динамики процесса и времени перегрузок по крутящему моменту от его среднего, длительно наблюдаемого значения.

Результаты исследования и их обсуждение. Из анализа полученных результатов следует, что энергоёмкость процесса зависит от скоростей резания, движения и геометрической формы резов.

Из графика зависимости $E_{пол} = f(V_{рез})$ для талых торфов (рис. 2) следует, что полученная при скорости 15,4 м/с энергоёмкость 0,23 кВт·ч/м³ имеет тенденцию к возрастанию при любом изменении скоростного режима.

Это объясняется тем, что при снижении скорости резания ниже указанного предела перерезание волокон торфа заменяется их обрывом с забиванием лезвий резов неперерезанными растительными остатками. При повышении скорости резания происходит диспергирование частиц торфа, их прессование под действием инерционных сил и увеличение числа линий резания на единицу разрабатываемого объема [5; 6].

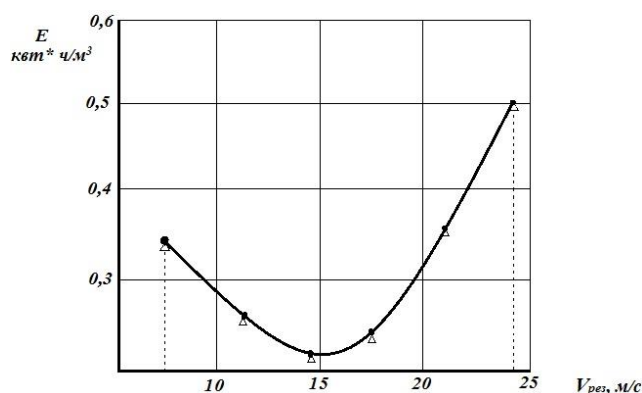


Рис. 2. Зависимость энергоёмкости прорезания дренажной щели от скорости резания ($E = f(V_P)$). Участок 3. Торф 0,8 м талый

На графике ($E_{пол} = f(V_{под})$) для мерзлого торфа (рис. 3) приведены результаты экспериментов по определению зависимости энергоёмкости процесса от скоростей резания, движения и геометрической формы резов.

Из приведенных данных следует, что замена заблокированного резания полублокированным и свободным (с увеличенной длиной стружки) снижает энергоёмкость резания в 1,55 и 2,6 раза соответственно (зависимости 2; 3; 5).

Можно отметить тенденцию к снижению энергоёмкости со снижением скорости резания с 24 до 3,2 м/с в 3,3 раза, однако при окружной скорости фрезерного диска менее 10–12 м/с прекращается экскавация разрыхленного торфа из щели метанием, что влечет за собой стопорение рабочих органов.

Исходя из формулы:

$$P^m \cdot l^n = const, \quad (2)$$

при $m < n$, где P — усилие резания; l — длина срезаемой стружки; m, n — коэффициенты условий резания.

Снижение энергоёмкости процесса при свободном характере резания мерзлых торфов происходит ввиду

увеличения длины срезаемой стружки для конкретной схемы монтажа резцов (рис. 4).

При этом выражение (2) преобразуется в вид [5]:

$$p^m \left(\frac{b}{\sin \varphi} \right)^n = C, \quad (3)$$

где $C = \text{const}$,

или:

$$p^m = \left(\frac{b}{\sin \varphi} \right)^{\frac{-n}{m}} \cdot C = \frac{C}{\sqrt[m]{(b / \sin \varphi) p^n}}, \quad (4)$$

где b — ширина прорезаемой щели; φ — угол между резцами, откуда следует, что усилие резания связано с шириной срезаемой стружки уравнением гиперболы высшего порядка и зависит от угла установки резцов φ относительно плоскости диска фрезы [8; 9].

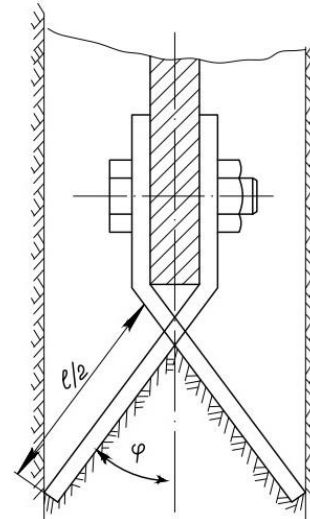


Рис. 4. Схема монтажа резцов со свободным характером резания на диск фрезы

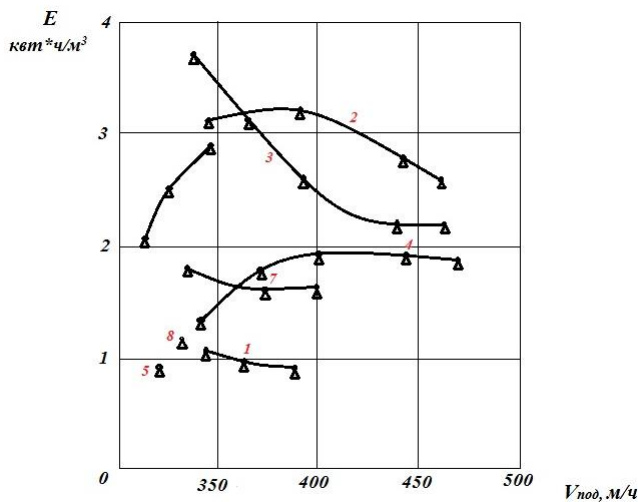


Рис. 3. Зависимости энергоемкости процесса резания мерзлого торфа от скорости резания, движения и геометрии резцов. Участок 3. Торф 0,8 м. Промерзание 0,9–1,0 м. $C = 51-87$. Резание свободное, $U_p = 24,7$ м/с, ширина щели $B = 100$ мм. 1. Резание блокированное, $U_p = 24,1$ м/с, $B = 50$ мм. 2. Резание блокированное, $U_p = 15,4$ м/с. 3. Резание блокированное, $U_p = 7,4$ м/с. 4. Резание блокированное, $U_p = 3,2$ м/с. 5. Резание полублокированное $U_p = 21$ м/с, $B = 110$ мм. 6. Резание полублокированное $U_p = 16,2$ м/с. 7. Резание полублокированное $U_p = 7,37$ м/с

Зависимости $E = f(V_{\text{под}})$, представленные на рис. 5, характеризуют процесс резания талых торфов. Из приведенных данных следует, что применение резцов с полублокированным и свободным скользящим характером резания привело к значительному снижению энергоемкости.

По данным А.Н. Зеленина [3], коэффициент блокировки резания ρ для грунтов принимается равным 1 в случае блокированного резания, 0,75 — полублокированного и 0,5 — свободного. Из экспериментальных данных значение коэффициента ρ для талых (мерзлых) торфов составляет соответственно 1; 0,44–0,36; 0,42–0,34; (1; 0,8–0,65; 0,34–0,35).

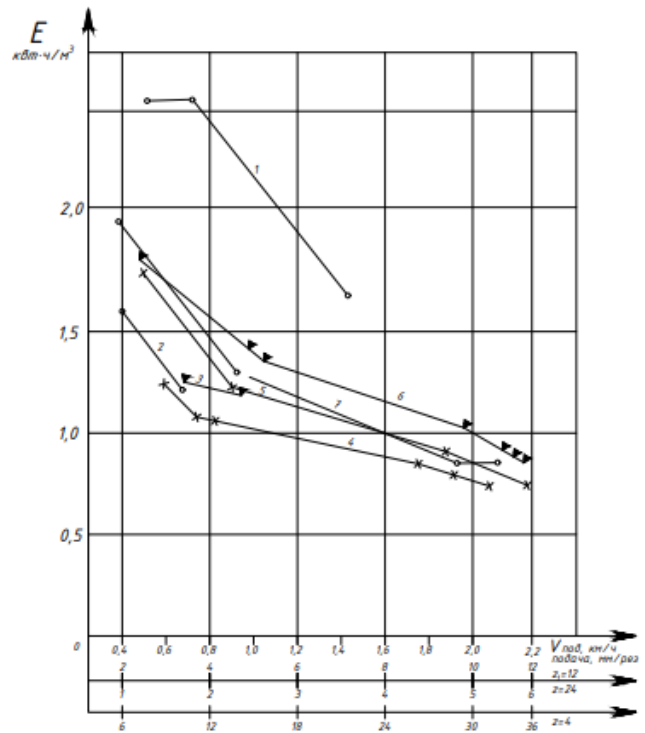


Рис. 5. Зависимость энергоемкости резания от скорости движения (подача на резец) для талых торфов $E = f(U_{\text{п}})$. Участок 1. Торф 0,9–1,0 м. Влажность 65–72 % $U_p = 22,0-24,9$ м/с. 1. Резание блокированное. $B = 54$ мм, 24 резца. 2. Резание полублокированное. $B = 160$ мм, 48 резцов. 3. Резание полублокированное. $B = 96$ мм. 4. Резание свободное. $B = 106$ мм, 12 групп. 5. Резание свободное. $B = 95$ мм. 6. Резание свободное. $B = 95$ мм, торф 0,4 м. 7. Резание свободное. $B = 95$ мм, 4 группы, торф 0,4 м

Расхождение полученных данных объясняется различием физико-механических свойств торфов и грунтов [10; 11]. Снижение значения μ 0,5 до 0,42–0,34 на торфах можно объяснить наличием у опытных резцов скользящего характера резания, когда резание происходит одновременно по касательному и нормальному направлениям по отношению к лезвию,

вследствие установки его режущей части под углом τ к направлению движения. При таком резании происходит как бы уменьшение угла заострения резца i согласно выражению:

$$tgi = tgi \cdot \cos \tau. \quad (5)$$

Влияние скользящего резания на энергоёмкость процесса в настоящей работе не рассматривается, однако следует отметить, что при величине угла τ менее 45° исключается обволакивание лезвия резца растительными волокнами, что положительно сказывается на качестве работы машины.

В общем виде касательная составляющая усилия резания с учетом влияния на ее величину скорости резания может быть определена по формуле:

$$P_{KVi} = K_V P_{KO}, \quad (6)$$

где P_{KO} — сила резания при скорости, принятой за условный нуль; K_V — коэффициент влияния скорости.

Тогда:

$$K_V = \frac{P_{KVi}}{P_{KO}}. \quad (7)$$

Составим уравнение проекций сил, действующих на торф при скорости V_0 (принятой за условный нуль) на ось Y:

$$N_{Г.P} \cos \alpha - T_{Г.P} \sin \alpha + N_{Г.Г} \cos[180 - (\alpha + \theta_0)] - T_{Г.Г} \sin[180 - (\alpha + \theta_0)] - R = 0 \quad (8)$$

где:

$N_{Г.P}$ — нормальная сила со стороны резца; $T_{Г.P}$ — касательная сила трения ядра о переднюю грань резца; $N_{Г.Г}$ — нормальная сила со стороны массива грунта; $T_{Г.Г}$ — касательная сила трения ядра о массив; R — сила сопротивления отрыву верхнего слоя торфа; Θ_0 — угол при вершине ядра уплотнения при скорости резания V_0 .

Выразим нормальные условия и силы трения через силу P_{KO} :

$$\begin{aligned} N_{Г.P} &= \frac{P_{KO} \cos \rho_0}{\sin(\alpha + \rho_0)}; \\ N_{Г.Г} &= \frac{P_{KO} \cos \mu_0}{\sin(\alpha + \Theta_0 - \mu_0)}; \\ T_{Г.P} &= \frac{P_{KO} \cos \rho_0 \operatorname{tg} \rho_0}{\sin(\alpha + \rho_0)}; \\ T_{Г.Г} &= \frac{P_{KO} \cos \mu_0 \operatorname{tg} \mu_0}{\sin(\alpha_0 + \Theta_0 - \mu_0)}; \end{aligned} \quad (9)$$

где ρ_0 — угол трения о торф с различными физико-механическими свойствами по металлу при скорости резания V_0 ; μ_0 — угол трения торфа по торфу при скорости резания V_0 .

Подставив выражения (8) в уравнение (9) и проведя тригонометрические преобразования, получим R:

$$R = P_{KO} [\operatorname{ctg}(\alpha + \rho_0) - \operatorname{ctg}(\alpha + \Theta_0 - \mu_0)]. \quad (10)$$

Далее выразим силу R через напряжения растяжения, действующие в момент отрыва верхней части стружки (раковина отрыва). При этом поверхность отрыва примерно равна 1/3 части боковой поверхности с высотой, равной h_{10} , радиусом нижнего основания r_0 и радиусом верхнего основания $r_0 + h_{10} \operatorname{ctg} \gamma_0$.

$$R = \frac{\sigma p V_0 \pi h_{10} (2r_0 + h_{10} + \operatorname{ctg} \gamma_0) \operatorname{ctg} \gamma_0}{3} \quad (11)$$

где $\sigma p V_0$ — сопротивление торфа разрыву, соответствующее скорости резания V_0 , н/см².

Приравняв правые части уравнений (10) и (11), определим силу резания при скорости V_0 :

$$P_{KO} = \frac{\sigma p v_0 \pi h_{10} (2r_0 + h_{10} \operatorname{ctg} \gamma_0) \operatorname{ctg} \gamma_0}{3 [\operatorname{ctg}(\alpha + \rho_0) - \operatorname{ctg}(\alpha + \Theta_0 - \mu_0)]} \quad (12)$$

Подобным же образом выразим и силу резания при скорости резания V_i :

$$P_{KVi} = \frac{\sigma p v_i \pi h v_i (2r v_i + h_i v_i \operatorname{ctg} \gamma v_i) \operatorname{ctg} \gamma v_i}{3 [\operatorname{ctg}(\alpha + \rho v_i) - \operatorname{ctg}(\alpha + \Theta_{vi} - \mu_{vi})]}, \quad (13)$$

где ρv_i , μ_{vi} — сопротивление торфа разрыву, соответствующее скорости резания V_i , н/см²; $\sigma p v_i$ — радиус нижнего основания отрыва при скорости v_i , см; $r v_i$ — угол наклона поверхности при скорости резания v_i ; γv_i — углы трения соответственно торфа по металлу при скорости резания v_i .

Подставляя выражения (12) и (13) в формулу и учитывая, что в диапазоне скоростей резания 0,2–6,0 м/с, рассматриваемом при расчете фрезы, σp , γ , Θ и выражение $2r v_i + h_i v_i \operatorname{ctg} \gamma v_i$ остаются практически постоянными, после преобразований получим:

$$K_V = \frac{h_i v_i [\operatorname{ctg}(\alpha + \rho_0) - \operatorname{ctg}(\alpha + \Theta - \mu_0)]}{h_{10} [\operatorname{ctg}(\alpha + \rho_{vi}) - \operatorname{ctg}(\alpha + \Theta - \mu_{vi})]} \quad (14)$$

Анализ формулы (15), а также сопоставления результатов экспериментальных исследований по резанию и деформированию торфа показывают, что с увеличением скорости движения резца сопротивление торфа с древесными включениями резанию повышается главным образом за счет увеличения угла его внутреннего трения и высоты отрыва.

Вычисления коэффициента влияния скорости K_V по формуле (14) показывают, что при изменении скорости от 0,2 м/с (принятой за условной нуль) до 6,13 м/с его величина увеличивается от 1,0 до 1,4–1,7 в зависимости от свойств торфа с древесными включениями, глубины резания и параметров резцов, что согласуется с результатами экспериментальных исследований по резанию торфа. Относительная ошибка вычислений не превышает 7–8 %.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Увеличение скорости резания от 0,2 до 6,13 м/с вызывает возрастание среднемаксимальной величины касательной составляющей усилия резания торфа с древесными включениями на 40–70 %, что необходимо учитывать при расчете сопротивлений резанию и выборе рациональных параметров рабочих органов щелерезных машин.
2. Энергозатраты на прорезание дренажной щели при замене заблокированного характера резания полублокированным и скользящим снижаются в 1,25–2,3 и 3 раза как на талых, так и на промерзших торфах.
3. Минимальная энергоёмкость резания талых торфов достигается при скорости 15–16 м/с. При повышении или снижении скорости резания энергоёмкость возрастает.
4. Для промерзших торфов энергоёмкость резания торфа прямо пропорциональна скорости резания.
5. Снижение значения μ 0,5 до 0,42–0,34 на торфах можно объяснить наличием у опытных резцов скользящего характера резания, когда резание происходит одновременно по касательному и нормальному направлениям по отношению к лезвию вследствие установки его режущей части под углом τ к направлению движения.
6. Во всех случаях испытаний увеличение подачи на резец обеспечивает снижение энергоёмкости процесса.
7. Повышение скорости движения от 0,2 до 6,0 м/с для скоростей резания 2–6 м/с вызывает снижение энергоёмкости процесса прорезания древесных включений на 485–492 % соответственно.
8. Повышение скорости резания в пределах 2–6 м/с при скоростях движения более 0,3 м/с вызывает возрастание энергоёмкости процесса прорезания древесных включений на 293–297 % соответственно.
9. Результаты определения затрат энергии на прокладку щелевых дрен в торфяных почвах в зависимости от конструктивных параметров рабочих органов и режимов их работы позволяют оценить энергоёмкость затрат работы на прокладку дрен и выбрать необходимые для выполнения технологического процесса энергетические средства.
10. На энергоёмкость процесса прокладки щелей большей глубины для строительства осушительных систем без прокладки канав в торфяных грунтах влияют следующие факторы:
 - угол резания β ;
 - угол наклона относительно режущей цепи к горизонтали α ;
 - длина цепи (глубина резания);
 - число зубьев z ;
 - скорость движения $V_{дв}$;
 - скорость резания $V_{рез}$.

Литература

1. Зеленин А.Н., Баловнев В.Н., Керов И.П. Машины для земляных работ. М.: Машиностроение, 1975. 422 с.
2. Инструкция по уходу и эксплуатации электрифицированной дренажно-винтовой машины ДВМ-5. М.: Госэнергоиздат, 1952. 61 с.
3. Константинов В.К. Эксплуатация лесосушительных систем. М.: Лесная пром-сть, 1979. 152 с.
4. Сабликов М.В. Сельскохозяйственные машины. Ч. 1: Устройство и работа. М.: Колос, 1968. 343 с.
5. Макунина Я.С., Долматов С.Н. Обоснование решений по снижению затрат мощности на минерализацию почвы при лесовосстановлении // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: сб. материалов IX Междунар. науч.-практической конф., посвящ. Дню космонавтики. В 3-х т. (10-14 апр. 2023 г.). Красноярск: ФГБОУ ВО «Сибирский гос. ун-т науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева», 2023. Т. 1. С. 523-525.
6. Орловский С.Н., Карнаухова А.И. Исследования режимов резания торфяных грунтов баровым рабочим органом // Инженерные решения для АПК: материалы Всерос. науч.-практической конф., посвящ. 83-летию со дня рождения проф. А.М. Лопатина (16 нояб. 2022 г.). Рязань: Рязанский гос. агротехнологический ун-т им. П.А. Костычева, 2022. С. 41-47.
7. Орловский С.Н., Карнаухова А.И., Соколова В.А. Крутильные колебания фермы тягового моста // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 3 (55). С. 43-47.
8. Карнаухова А.И. К вопросу обеспечения энергосбережения при работе лесопожарных агрегатов // Технологии и оборудование садово-паркового и ландшафтного строительства: сб. ст. Всерос. науч.-практической конф. (20 дек. 2018 г.). Красноярск: ФГБОУ ВО «Сибирский гос. ун-т науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева», 2019. С. 410-414.
9. Карнаухова А.И., Попов Д.А. Анализ изменения момента сопротивления на валу фрезы лесопожарного агрегата // Машиностроение: новые концепции и технологии: сб. ст. Всерос. науч.-практической конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (18-19 апр. 2018 г.). Красноярск: ФГБОУ ВО «Сибирский гос. ун-т науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева», 2018. С. 24-30.
10. Долматов С.Н., Макунина Я.С. Плотность сети лесных дорог как фактор устойчивого лесопользования на примере лесов Красноярского края // Вестн. Поволжского гос. технологического ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2023. № 3 (59). С. 87-97.
11. Орловский С.Н., Войнаш С.А., Соколова В.А. Исследование работоспособности щелевого дренажа на осушении торфяников // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2023. № 1. С. 424-428.
12. Шехихачев Ю.А., Апажев А.К., Дзуганов В.Б. Разработка и обоснование параметров и режимов работы дренажной машины // Вестн. НГИЭИ. 2023. № 9 (148). С. 51-62.
13. Орловский С.Н., Соколова В.А. Пути рационального использования заболоченных земель Ермаковского района Красноярского края // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Восьмой Всерос. науч.-практической конф. с междунар. участием (24 мая 2022 г.). Петрозаводск: ПетрГУ, 2022. С. 142-146.
14. Сайтов В.Е. Мелиоративные машины // Опорные конспекты к лекциям по с.-х. машинам. М.: Изд. дом Акад. Естественных наук, 2017. С. 86-95.
15. Стуцко Е.В., Дальков М.П. Способ строительства дренажа: авт. свид. № 1656055 А1 СССР, МПК E02B 11/00; заявл. 11.10.1988; опубл. 15.06.1991.
16. Прудников С.Н., Купренко А.И., Морозов М.А., Котиков Ф.Н. Дискофрезерный щелеватель: пат. на полезную модель № 76539 U1 РФ, МПК A01B 35/00. № 2008114028/22; заявл. 09.04.2008; опубл. 27.09.2008.

17. Orlovskiy S.N., Sokolova V.A., Svoikin F.V. Optimal parameters of a forestry tractor for performing low-energy work // AIP conference proceedings: International Scientific and Practical Conference «Technology in Agriculture, Energy and Ecology» (TAEE2022), Dushanbe, Tajikistan, 24 may 2022 year. V. 2767. AIP Publishing: AIP Publishing, 2022. P. 020004.
18. Peltomaa Rauno. Drainage of forests in Finland. Irrigation and Drainage. 2007. 56. P. 151-159.
19. Holden J., Chapman P.J., Labadz J.C. Artificial drainage of peatlands: hydrological and hydrochemical process and wetland restoration. Prog. Phys. Geog. 2004. 28. P. 95-123.
20. Karjalainen T., Leinonen T., Gerasimov Y., Husso M., Karvinen S. Intensification of forest management and improvement of wood harvesting in Northwest Russia - Final report of the research project. Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute. 2009. 110. 151 p.
- ros. nauch.-prakticheskoy konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh (18-19 apr. 2018 g.). Krasnoyarsk: FGBOU VO «Sibirskiy gos. un-t nauki i tekhnologii im. akad. M.F. Reshetneva», 2018. P. 24-30.
10. Dolmatov S.N., Makunina Ya.S. Density of the forest road network as a factor in sustainable forest management using the example of Krasnoyarsk region forests // Vestnik of Volga State University of Technology. Ser. Forest. Ecology. Nature management. 2023. № 3 (59). P. 87-97.
11. Orlovskiy S.N., Vojnash S.A., Sokolova V.A. Study of the performance of slot drainage for peatland drainage // News of the Tula State University. Technical sciences. 2023. № 1. P. 424-428.
12. Shekihachev Yu.A., Apazhev A.K., Dzuganov V.B. Development and justification of the parameters and operating modes of a drainage machine // Bulletin NGIEI. 2023. № 9 (148). P. 51-62.
13. Orlovskiy S.N., Sokolova V.A. Ways of rational use of wetlands of the Ermakovskiy district of the Krasnoyarsk Territory // Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy Vos'moj Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem (24 maya 2022 g.). Petrozavodsk: PetrGU, 2022. P. 142-146.
14. Saitov V.E. Reclamation machines // Opomye konspekty k lekciyam po s.-h. mashinam. M.: Izd. dom Akad. Estestvoznaniya, 2017. P. 86-95.
15. Stucko E.V., Dal'kov M.P. Drainage construction method: avt. svid. № 1656055 A1 SSSR, MPK E02B 11/00; zayavl. 11.10.1988; opubl. 15.06.1991.
16. Prudnikov S.N., Kuprenko A.I., Morozov M.A., Kotikov F.N. Disc-milling slasher: pat. na poleznuyu model' № 76539 U1 RF, MPK A01B 35/00. № 2008114028/22; zayavl. 09.04.2008; opubl. 27.09.2008.
17. Orlovskiy S.N., Sokolova V.A., Svoikin F.V. Optimal parameters of a forestry tractor for performing low-energy work // AIP conference proceedings: International Scientific and Practical Conference «Technology in Agriculture, Energy and Ecology» (TAEE2022), Dushanbe, Tajikistan, 24 may 2022 year. V. 2767. AIP Publishing: AIP Publishing, 2022. P. 020004.
18. Peltomaa Rauno. Drainage of forests in Finland. Irrigation and Drainage. 2007. 56. P. 151-159.
19. Holden J., Chapman P.J., Labadz J.C. Artificial drainage of peatlands: hydrological and hydrochemical process and wetland restoration. Prog. Phys. Geog. 2004. 28. P. 95-123.
20. Karjalainen T., Leinonen T., Gerasimov Y., Husso M., Karvinen S. Intensification of forest management and improvement of wood harvesting in Northwest Russia - Final report of the research project. Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute. 2009. 110. 151 p.

References

1. Zelenin A.N., Balovnev V.N., Kerov I.P. Machines for earthworks. M.: Mashinostroenie, 1975. 422 p.
2. Instructions for the care and operation of the electric drainage-screw machine DVM-5. M.: Gosenergoizdat, 1952. 61 p.
3. Konstantinov V.K. Operation of forest drainage systems. M.: Lesnaya prom-st', 1979. 152 p.
4. Sablikov M.V. Agricultural machines. Ch. 1: Ustrojstvo i rabota. M.: Kolos, 1968. 343 p.
5. Makunina Ya.S., Dolmatov S.N. Justification of decisions to reduce power costs for soil mineralization during reforestation // Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki: sb. materialov IX Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf., posvyashch. Dnyu kosmonavtiki. V 3-h t. (10-14 apr. 2023 g.). Krasnoyarsk: FGBOU VO «Sibirskiy gos. un-t nauki i tekhnologii im. akad. M.F. Reshetneva», 2023. V. 1. P. 523-525.
6. Orlovskiy S.N., Karnauhov A.I. Research of cutting modes of peat soils with a bar working element // Inzhenernye resheniya dlya APK: materialy Vseros. nauch.-prakticheskoy konf., posvyashch. 83-letiyu so dnya rozhdeniya prof. A.M. Lopatina (16 noyab. 2022 g.). Ryazan': Ryazanskij gos. agrotekhnologicheskij un-t im. P.A. Kostycheva, 2022. P. 41-47.
7. Orlovskiy S.N., Karnauhov A.I., Sokolova V.A. Torsional vibrations of a traction bridge truss // Systems. Methods. Technologies. 2022. № 3 (55). P. 43-47.
8. Karnauhov A.I. On the issue of ensuring energy saving during operation of forest fire units // Tekhnologii i oborudovanie sadovo-parkovogo i landshaftnogo stroitel'stva: sb. st. Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (20 dek. 2018 g.). Krasnoyarsk: FGBOU VO «Sibirskiy gos. un-t nauki i tekhnologii im. akad. M.F. Reshetneva», 2019. P. 410-414.
9. Karnauhov A.I., Popov D.A. Analysis of changes in the resistance moment on the shaft of a forest fire unit cutter // Mashinostroenie: novye koncepcii i tekhnologii: sb. st. Vse-