

Экспериментальные исследования на моделях фрезерного рабочего органа

С.-С.Ш. Саая

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

sai-suu2014@yandex.ru

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

Статья поступила 19.10.2024, принята 02.11.2024

Приводятся результаты исследований на лабораторном стенде моделей рабочего органа. С целью изучения процесса взаимодействия данного рабочего органа с разрабатываемой средой и выбора его рациональных параметров были проведены лабораторные исследования на моделях. При выборе параметров модели представлено возможное полное подобие процесса фрезерования. В соответствии с методами приближенного физического моделирования были определены критерии подобия и коэффициенты подобия. Линейный масштаб был выбран равным $K_1 = 3,5$. Определены реакции, действующие на ножи при фрезеровании грунта вместе с древесиной. Все элементы рабочего органа, симметричные относительно продольно-вертикальной плоскости агрегата и направляющей кривой, составляющие реакции, перпендикулярные оси трассы дрены взаимно уравновешиваются и при рассмотрении суммарных реакций, действующих на ножи, можно считать, что они расположены в плоскости движения, т. е. в плоскости направляющей кривой. Исследования по определению влияния скорости подачи v_n и числа оборотов фрезы $n_{фр}$ (скорости вращения фрезы (v_0)) при фрезеровании древесины проводились с использованием ортогонального центрального композиционного плана ОЦКП. Дается анализ результатов исследований, определены рациональные параметры рабочего органа фрезерной машины, приводятся эмпирические формулы зависимости энергоемкости процесса фрезерования от скорости подачи и частоты вращения рабочего органа. В соответствии с методами приближенного физического моделирования были определены критерии подобия и коэффициенты подобия. Приведены графики зависимостей момента на валу фрезы от подачи на нож для различных режущих элементов и зависимости момента на валу фрезы от подачи на нож для фрез различного диаметра. Полученные результаты были использованы при проектировании рабочего органа фрезерной машины МЭ-403, испытания которой подтвердили правильность сделанных выводов.

Ключевые слова: фреза; физическое моделирование; параметр; коэффициент подобия; дрена.

Experimental studies on models of a milling working element

S.-S.Sh. Saaya

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

sai-suu2014@yandex.ru

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

Received 19.10.2024, accepted 02.11.2024

The results of studies on the laboratory bench of models of the working element are presented. In order to study the process of interaction of this working element with the developed environment and to select its rational parameters, laboratory studies are carried out on models. When selecting the parameters of the model, the possible complete similarity of the milling process is shown. In accordance with the methods of approximate physical modeling, the similarity criteria and similarity coefficients are determined. The linear scale is chosen equal to $K_1 = 3.5$. The reactions acting on knives when milling soil together with wood have been determined. All elements of the working body symmetrical relative to the longitudinal-vertical plane of the unit and the guide curve, the components of the reactions perpendicular to the axis of the drainage route are mutually balanced, and when considering the total reactions acting on the knives, it can be considered that they are located in the plane of movement, that is, in the plane of the guide curve. The studies on determining the effect of feed rate v_n and cutter speed $n_{фр}$ (cutter rotation speed (v_0)) during wood milling are conducted using the orthogonal central composition plan of the OCCP. The analysis of the research results is given, rational parameters of the working element of the milling machine are determined, empirical formulas are given for the dependence of the energy intensity of the milling process on the feed rate and rotation frequency of the working element. In accordance with the methods of approximate physical modeling, similarity criteria and similarity coefficients are determined. Graphs are given for the dependences of the torque on the cutter shaft on the feed to the knife for various cutting elements and the dependence of the torque on the cutter shaft on the feed to the knife for cutters of different diameters. The obtained results are used in designing the working element of the ME-403 milling machine, the tests of which confirm the correctness of the conclusions made.

Keywords: cutter; physical modeling; parameter; similarity coefficient; drain.

Введение. Ускоренное развитие лесного и сельскохозяйственного производства неразрывно связано с расширением обрабатываемых площадей. Традиционная технология освоения лесных площадей предусматривает вовлечение в промышленный оборот максимальных площадей лесопокрытых земель с целью их интенсивной эксплуатации. Такая экстенсивная технология лесопользования рано или поздно сталкивается с ограничениями по эксплуатируемым лесным площадям либо логистике и транспортному обеспечению лесопромышленного предприятия. Лесные массивы не везде имеют возможность роста в условиях, способствующих формированию качественного высокобонитетного насаждения. Одним из факторов, ограничивающих успешный рост и развитие древостоев, является избыточное переувлажнение и заболачивание территории.

Территория РФ характеризуется наличием значительных территорий, характеризующихся переувлажненными или заболоченными. Доля болот в лесном фонде превышает 20 %, а для таежной зоны Западной Сибири — 40...50 % [1].

В Сибири наиболее трудоемкой операцией при производстве культуртехнических работ является удаление крупных пней. С целью повышения уровня механизации этого процесса было намечено разработать оборудование, способное удалять эффективные крупные пни диаметром более 0,45 м, в том числе в зимний период.

При проведении культуртехнических работ по сводке кустарника и мелколесья и подготовке территорий для сельскохозяйственного и лесного использования или добычи торфа используются машины для фрезерования закустаренных земель. Для снижения энергоемкости процесса фрезерования грунта вместе с древесиной рабочий орган на этих машинах применяется без сплошной обечайки, с плоскими прямыми или косопоставленными ножами.

С целью изучения процесса взаимодействия данного рабочего органа с обрабатываемой средой и выбора его рациональных параметров были проведены лабораторные исследования на моделях.

При выборе параметров модели необходимо обеспечить возможно полное подобие процесса фрезерования. В соответствии с методами приближенного физического моделирования были определены критерии подобия и коэффициенты подобия [1; 2].

В результате анализа факторов, влияющих на процесс, были выделены определяющие параметры. Переменные управления: D — диаметр фрезы; B — ширина фрезы; H — глубина фрезерования; α — угол резания; γ — задний угол резания; ψ — угол в плане; V_n — скорость подачи; V_o — скорость вращения фрезы.

Переменные состояния: M — момент на валу фрезы; R — усилие на ноже; N — мощность фрезерования.

Параметры: C_w — сцепление; φ — угол внутреннего трения грунта; ρ — угол внешнего трения грунта; C — число ударов динамического плотномера ДорНИИ; τ_n — предельное напряжение древесины сколу; $\zeta_{см}$ — предельное напряжение древесины смятию; f_n и f — коэффициенты трения древесины о древесину и сталь.

Таким образом, общее число физических величин, характеризующих процесс, равно $n = 19$.

Для данной системы число независимых единиц измерения равняется трем. В качестве основных единиц выбраны момент на валу фрезы M , диаметр фрезы D и время t , $m = 3$. По Π -теореме, необходимое число критериев подобия определяется по формуле:

$$K = n - m \quad (1)$$

Используя полученные критерии подобия и учитывая, что моделирование предполагалось проводить в среде оригинала, были определены коэффициенты подобия. Линейный масштаб был выбран равным $K_1 = 3,5$.

Определение реакций, действующих на ножи при фрезеровании грунта вместе с древесиной. Так как все элементы рабочего органа симметричны относительно продольно-вертикальной плоскости агрегата и направляющей кривой, составляющие реакции, перпендикулярные оси трассы дрены взаимно уравниваются, и при рассмотрении суммарных реакций, действующих на ножи, можно считать, что они расположены в плоскости движения, т. е. в плоскости направляющей кривой.

Горизонтальная ΣR_H и вертикальная ΣR_B составляющие суммарной реакции (κH) грунта с древесной растительностью глубиной 0,8 м (см. рис. 3.1) определяются по выражению:

$$\Sigma R = \sqrt{(\Sigma R_c)^2 + (\Sigma R_g)^2}, \quad (2)$$

где R_{x1} и R_{z1} — горизонтальная и вертикальная составляющие реакции грунта с древесной растительностью на нижнюю часть рабочего органа, H ; составляющие реакции грунта R_{x1} и R_{z1} , H определяются по следующим выражениям:

$$R_{x1} = c \cdot S \cdot B_1 \cdot B_2 + \gamma_c \cdot S \cdot h_k \cdot B_1 \cdot B_3 \quad (3)$$

$$R_{z1} = c_0 \cdot S \cdot B_2 \cdot B_4 + \gamma_c \cdot S \cdot h_k \cdot B_3 \cdot B_4; \quad (4)$$

где:

$$B_1 = \frac{2 \cdot \cos \varphi}{\cos[0,5(\psi_{лу} + \varphi_c)] \cdot [\sin \varphi_a \cdot \sin \alpha_a + tg \varphi_c]} \quad (5)$$

$$\frac{2 \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \sin^2 \psi_a \sin^2 \xi \cdot (1 + \cos^2 \alpha_a) tg^2(\psi_a + \varphi_c + \varphi_c) 0,5}}$$

$$B_2 = \frac{\cos \varphi_c}{\{\sin \alpha_{лу} \cdot \cos[0,5 \cdot (\psi_{лу} + \varphi_c)]\}}; \quad (6)$$

$$B_3 = \frac{ctg \xi}{(2 \sin \alpha_a \cdot \cos \psi_a)}; \quad (7)$$

$$B_4 = 2 \cos \varphi \left\{ \cos[0,5(\psi_{лу} + \varphi_c)] \right\}^{-1} \cdot (\cos \psi_a - tg \varphi_c \cdot \sin \psi_a \cdot \sin \xi) \quad (8)$$

где c_0 — сила сцепления грунта, H/m^2 ; $c_0 = 15\ 000\ H/m^2$; S — площадь поперечного сечения расчищаемой трассы, m^2 ; γ_r — объемная сила тяжести снежного покрова, H/m^3 ; $\gamma_r = 6\ 000\ H/m^3$; h_k — высота призмы волочения (кавальера); H_k , b_d — глубина (0,8) и ширина (2,5) расчищаемой трассы, m ; α_k — угол наклона откоса каваль-

ера к горизонту, *град.*, $\alpha_k = 40^0$; f_p — коэффициент разрыхления грунта, 0,8; ϕ_c, ϕ_r — соответственно углы внешнего и внутреннего трения грунта; $\phi_c = \text{arctg } f_c, \phi_r = \text{arctg } f_r$; $f_c = 0,6, f_r = 0,1$; ψ_n и α_n — углы резания и захвата лемеха (30^0 и 40^0 соответственно); ξ — угол между относительной траекторией движения грунта по лемеху и его лезвию, $\xi = \alpha_n$; $\alpha_{ли}, \psi_{ли}$ — соответственно углы установки лезвий, *град.*

$$\psi_{ли} = \arccos \cdot \left[\left[\varphi \pm \cos \beta' \cdot \sqrt{\frac{\cos^2 \beta' + \cos^2 \psi_n}{\cos^2 (\beta + \phi_c) - \Phi^2}} \right] \right] \rightarrow \quad (9)$$

$$\rightarrow \cdot (\cos^2 \beta' + \cos^2 \psi_n)^{-1};$$

$$\cos(\alpha_{ли} - \alpha_n) = (\cos \phi_c - \cos \psi_n \cos \psi_{ли}) \cdot (\sin \psi_n \cdot \sin \psi_{ли})^{-1}; \quad (10)$$

$$\Phi = [\cos \phi_c - \sin(\beta + \phi_c) \cdot \sin \psi_n \sin \beta'] \cdot \cos \psi_n; \quad (11)$$

$$\beta = \text{arctg}(tg \psi_n \cdot \sin \xi); \quad (12)$$

$$\beta' = \text{arctg} \cdot (tg \xi \cdot \cos^{-1} \psi_n); \quad (13)$$

Угол наклона (*град.*) равнодействующей ΣR реакции расчищаемого грунта (см. рис. 1):

$$\Theta_R = \text{arctg} \left(\frac{\Sigma R_x}{\Sigma R_z} \right). \quad (14)$$

Вертикальная координата, *м*, точки O' приложения реакции расчищаемого грунта $h_z = (0,4 \dots 0,5)$ Н_к.

Для расчетов агрегата с ножами необходимо знать его тяговое сопротивление $F_{тк}$ и вертикальную составляющую $F_{вк}$ сил, действующих на конструкцию.

Тяговое сопротивление и вертикальную составляющую находим по выражениям:

$$F_{тк} = 2 (R_{x1}) \cdot \sin \alpha, \quad (15)$$

где α — угол отклонения силы сопротивления от продольной оси рабочего органа, *град.* $\alpha = 40^0$.

$$F_{вк} = 2 \cdot R_{z\Sigma}. \quad (16)$$

Расчет усилий, действующих на рабочие органы, производится для определения реакций, действующих на ножи при расчистке трасс (полос) от нежелательной древесной растительности мягколиственных пород. Выполнение расчетов необходимо для расчетов тягового усилия, необходимого для выполнения технологического процесса расчистки полос в заданных внешних условиях; прочностных расчетов всех элементов конструкции рабочего органа и его навесной системы.

Далее при анализе полученных данных находим критерии подобия и коэффициенты подобия.

В соответствии с определенными коэффициентами подобия были определены параметры модели и изготовлена модель фрезерного рабочего органа. Коэффициенты подобия и параметры оригинала и модели приведены в таблице.

Исследования проводились на лабораторном стенде НПО «ВНИИЗеммаш». Стенд состоит из тележки с грунтовым каналом, портала, привода и пульта управления. На ракетке траверсы установлена тензометрическая рамка. Дополнительно к стенду были изготовлены ванна с зажимом для деревянных брусков, одноступенчатый цилиндрический редуктор и модель фрезерного рабочего органа. Привод механизмов грунтового канала и привод рабочего органа осуществляются от насосной станции, что позволяет бесступенчато регулировать скорость подачи и скорость вращения фрезы.

Общий вид лабораторного стенда показан на рис. 1.

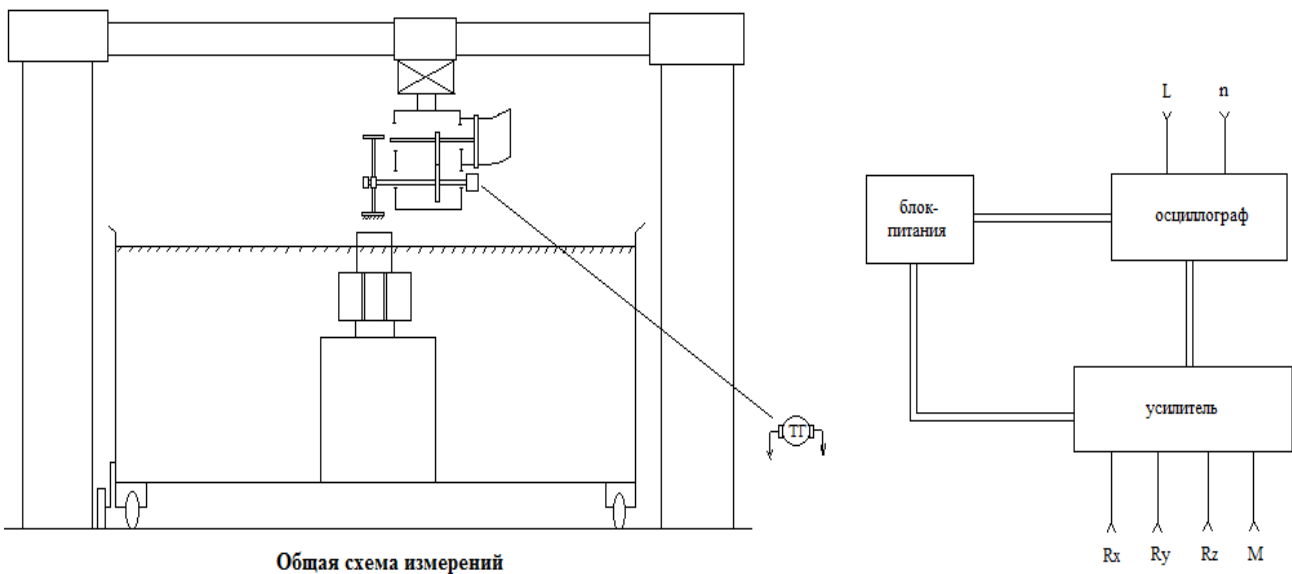


Рис. 1. Общая схема измерений

В качестве рабочей среды использовались песок и сосновые бруски прямоугольного и круглого сечения, кото-

рые крепились в специальном зажиме. Характеристики грунта и древесины приведены в таблице.

Таблица. Определение параметров модели

Определяющие параметры	Коэффициенты подобия	Оригинал	Модель
Диаметр фрезы, <i>м</i>	$K_D = K_1$	1,03	0,3
Ширина фрезы, <i>м</i> (секции)	$K_B = K_1$	0,30–0,36	0,1
Глубина фрезерования, <i>М</i>	$K_H = K_1$	0,05–0,40	0,02
Угол резания, <i>град.</i>	$K_\alpha = 1$	30–55	45
Задний угол резания, <i>град.</i>	$K_\gamma = 1$	8–15	10
Угол в плане, <i>град.</i>	$K_\psi = 1$	90; 140; 120	90; 70; 160; 140; 120
Скорость подачи, <i>м/с</i>	$K_{Vn} = K_1$	0,025–01,30	0,009–0,020
Окружная скорость фрезы, <i>м/с</i>	$K_{V0} = K_1$	7–14	2–6
Момент на валу фрезы, <i>Нм</i>	$K_M = K_1^3$		
Усилия на ноже, <i>Н</i>	$K_M = K_1^3$		
Мощность, <i>кВт</i>	$K_M = K_1^3$		
Параметры рабочей среды			
А. Древесина			
Предельное напряжение древесины смятию, <i>Н/м²</i>			
вдоль волокон	$K_{\sigma_{см}} = 1$	$(20-50) 10^6$	$4,9 10^6$
поперек волокон	$K_{\sigma_{см}} = 1$	$(1-4) 10^6$	$3,9 10^6$
Предельное напряжение древесины сколу, <i>Н/м²</i>	$K_{\tau_{и}} = 1$	$(6-10) 10^6$	$9 10^6$
Коэффициент трения древесины по древесине	$K_{f_{и}} = 1$	0,4–0,6	0,5
Коэффициент трения древесины по стали	$K_f = 1$	0,2–0,66	0,3
Б. Грунт			
Сцепление, <i>Н/м²</i>	$K_{c_{w}} = 1$	10–60000	100–1000
Плотность, <i>кг/м³</i>	$K_{\rho_{пл}} = 1$	800–1900	1 600
Угол внутреннего трения грунта, <i>град.</i>	$K_\phi = 1$	20–45	39–42
Угол внешнего трения грунта, <i>град.</i>	$K_\rho = 1$	18–35	29–30
Число ударов динамического плотномера ДорНИИ	$K_c = 1$	1–8	1–2

Для проведения тензометрических измерений использовались осциллограф НО-41, усилитель УТ-4-1, тензометрическая рамка для измерения горизонтальной, вертикальной и боковой составляющих усилия на ноже, тахогенератор для измерения числа оборотов фрезы, торцевой токосъемник и тензодатчики, наклеенные на вал редуктора для измерения момента крутящего, датчик перемещения. Общая схема измерений представлена на рис. 3.

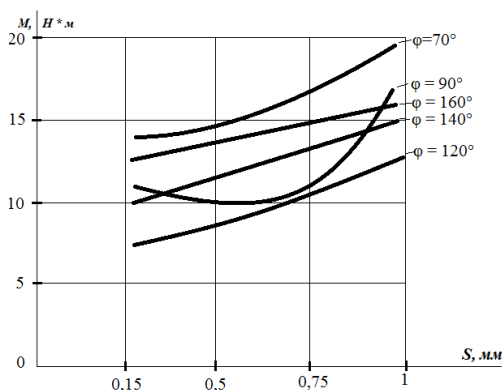
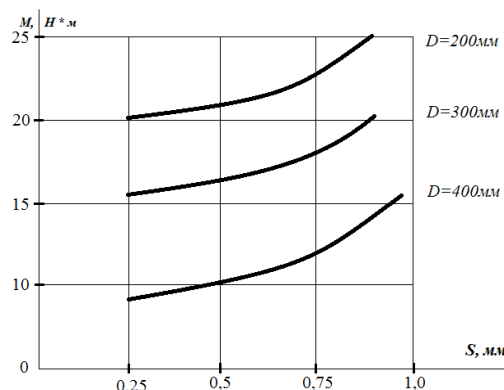
Эксперименты проводились с использованием теории планирования экспериментов [3]. Варьировались следующие параметры управления — D , H , ϕ , v_n , v_0 и регистрировались аппаратурой переменные составляющие M , R .

С целью выбора рациональной формы плоских сопоставленных ножей было проведено сравнение прямого (угол в плане $\phi = 90^\circ$), косого одностороннего ($\phi = 70^\circ$) и косых двухсторонних ($\phi = 120^\circ$, 140° и 160°) ножей. Графики зависимости момента на валу фрезы M от величины подачи на нож S при фрезеровании древесины различными ножами приведены на рис. 2.

Как видно на графиках, наименьшие нагрузки получены при фрезеровании косым двухсторонним ножом с углом в плане $\phi = 120^\circ$. Анализ снимков скоростной киносъемки процесса фрезерования показывает, что эти ножи обладают наилучшей выносной способностью.

Исследование влияния диаметра фрезы на процесс фрезерования показало, что с увеличением диаметра момент на валу фрезы уменьшается (ширина фрезерования оставалась постоянной). График зависимости момента на валу фрезы M от величины подачи на нож

S при фрезеровании древесины фрезами с различным диаметром приведен на рис. 3.

**Рис. 2.** Зависимость момента на валу фрезы от подачи на нож для различных режущих элементов**Рис. 3.** Зависимость момента на валу фрезы от подачи на нож для фрез различного диаметра

Исследования по определению влияния скорости подачи v_n и числа оборотов фрезы $n_{фр}$ (скорости вращения фрезы (v_0)) при фрезеровании древесины проводились с использованием ортогонального центрального композиционного плана ОЦКП [3].

В качестве функции отклика принят момент на валу фрезы M .

Уравнение регрессии в кодированном виде имеет следующий вид:

$$y = 21,15 - 1,90X_1 + 2,02X_2 - 1,83X_1^2,$$

где X_1 — число оборотов фрезы; X_2 — скорость подачи.

Мощность:

$$N_{дв} = M \cdot \omega > \frac{M \cdot n}{60}, \quad (17)$$

далее:

$$A = N_{дв} \cdot t + Nj(\text{инерция}) = N_e \cdot \frac{S}{V} + Nj \quad (18)$$

Этапы расчетов оптимизации производим с учетом схемы расположения пней на участке (рис. 4).

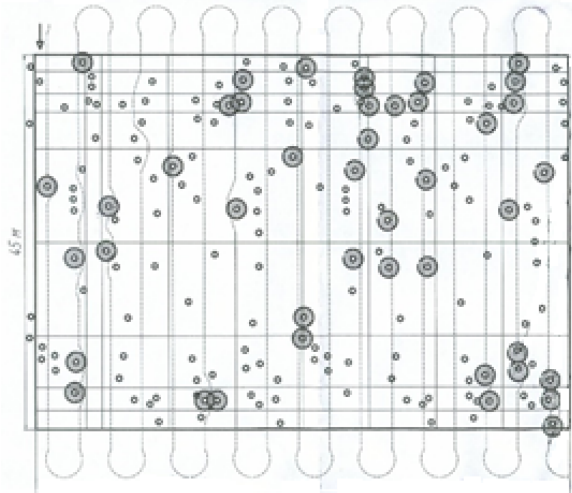


Рис. 4. Схема расположения пней на участке подготовки почвы под лесные культуры (полосная вспашка)

Движение по ровному участку между пней без встречи с ними (лесная почва):

$M \cdot \omega \geq \Sigma N$ путь — S — случайная функция:

$$A = N \cdot \frac{S}{V} \quad V = \frac{S_{\text{участка}}}{V_{\text{участка}}} \quad (19)$$

Проверка по критерию $P_{кр} < P_{сц.}$

Встреча рабочего органа с преодолимым пнем.

$$M_c \leq M_e \quad N = M_e \cdot \omega \quad M_e = f(d \text{ пня})$$

$$M_{дв} = M_c \cdot \omega > N_e \text{ с потерями}$$

Проверка по критерию $P_{кр} < P_{сц}$

$$\omega_{\text{м макс}} < \omega < \omega_{\text{ном}}$$

Системы уравнений реакции ДВС от K_p, J , регулирования.

Реакции сил сопротивления от K_d и τ .

Усилия преодоления пня от его диаметра и расстояния в генераторе случайных чисел в виде переменной:

$$M_c \geq M_e$$

$$M_c = M_e + J \frac{d\omega}{dt} \quad (20)$$

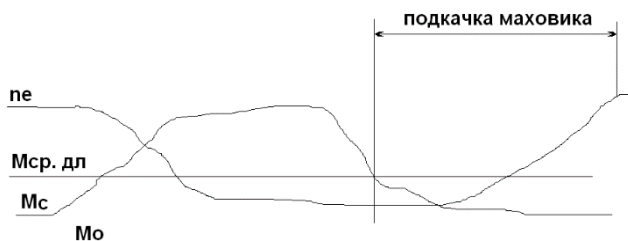


Рис. 5. Выход на безрегуляторную ветвь

Проверка восстановления n_e ном по критерию

$$M_{e \text{ макс}} > M_c$$

$$M_c = M_{e \text{ макс}} + J \quad (21)$$

$$M_c < M_{\text{макс}} < J \frac{d\omega}{dt}$$

Результат 4-х этапов — полиномы, дающие плоскость:

1. $y =$ расход энергии $A = f(V)$.

2. Производительность $\Pi = f(V)$.

В тех же координатах.

Линия пересечения плоскостей даст оптимум.

Анализ уравнения регрессии показывает, что увеличение числа оборотов фрезы и уменьшение скорости подачи снижает нагрузку на фрезу, однако при этом увеличивается энергоёмкость процесса и возрастает износ режущих элементов. Поверхность отклика представлена на рис. 6.

Исследования на лабораторном стенде позволили определить рациональные параметры рабочего органа с плоскими косопоставленными ножами ($\alpha = 45-50^\circ$; $\varepsilon = 40-45^\circ$; $\varphi = 120^\circ$). Получено, что увеличение диаметра рабочего органа при одной и той же ширине захвата рабочего органа позволяет снизить энергоёмкость процесса фрезерования. Увеличение скорости вращения фрезы снижает нагрузку, действующую на фрезу, улучшает вынос измельченной массы грунта и древесины из забоя.

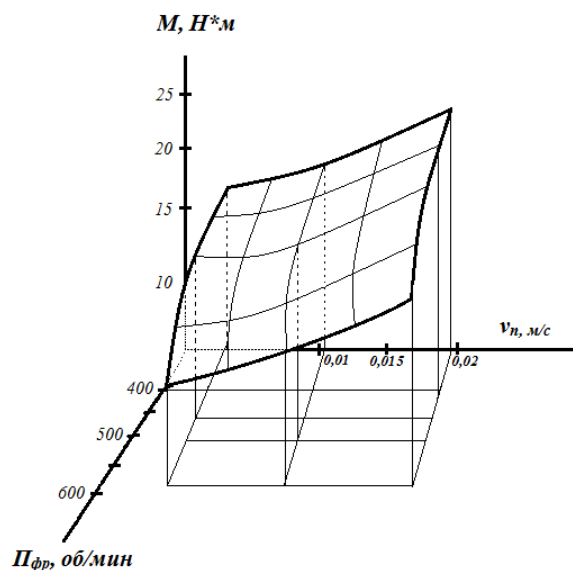


Рис. 6. Поверхность отклика

Полученные результаты были использованы при проектировании рабочего органа фрезерной машины

МЭ-403, испытания которой подтвердили правильность сделанных выводов.

Литература

- Кадыров А.С., Глотов Б. Н., Бестембек Е.С. Определение параметров нагружения фрезерного рабочего органа большого диаметра // Изв. высш. учеб. заведений. Строительство. 2013. № 1 (649). С. 101-106.
- Ноев Д.М., Какебаев Э.Р., Константинова А.А., Соколов Д.А. Исследование рабочих органов вертикально-фрезерного культиватора // Инновационная деятельность в АПК: состояние, проблемы, перспективы: сб. материалов науч.-практической конф. (25 февр. 2020 г.). Якутск: Северо-Восточный федер. ун-т им. М.К. Аммосова, 2020. С. 218-222.
- Демиденко А.И., Снигерев Д.С., Ваймер Е.Ю. Исследование фрезерного рабочего органа для копания узких прорезей в грунте // Вестн. Сибирской гос. автомобильно-дорожной акад. 2012. № 6 (28). С. 27-34.
- Созонтов А.В. Совершенствование рабочих органов фрезерной секции дерниной сеялки // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики: материалы XVI Междунар. науч.-практической конф. (6 февр. 2023 г.). Киров: ФГБОУ ВО Вятский гос. агротехнологический ун-т, 2023. С. 203-207.
- Кадыров А.С., Кунаев В.А., Мулдагали А., Кузнецов Е.В. Разработка конструкции фрезерного рабочего органа для рыхления прочных и мерзлых грунтов // Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика: материалы XXI Междунар. науч.-практической конф. (3-4 апр. 2017 г.). Алматы: Казахская акад. транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева, 2017. С. 393-396.
- Андреева Е.В. К обоснованию параметров предохранительного устройства фрезерных рабочих органов для модернизации дернинных сеялок // Инженерно-техническое обеспечение АПК: реф. журнал. 2009. № 4. С. 1068.
- Мисиров М.Х., Егожев А.А., Алиев Н.А., Апхудов Х.А. Осевые силы в фрезерных рабочих органах // Энергоресурсосбережение и энергоэффективность: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практической конф. (22-23 дек. 2023 г.). Нальчик: Кабардино-Балкарский гос. аграрный ун-т им. В.М. Кокова, 2023. С. 190-193.
- Кадыров А.С., Сулеев Б.Д., Курмашева Б.К. Анализ нагружения фрезерного рабочего органа // Вестн. Казахской акад. транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2021. № 1 (116). С. 44-49.
- Шерстнев Н.С. Технология работы дорожных машин с фрезерным рабочим органом // Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки: материалы междунар. науч.-практической конф. (15-16 дек. 2014 г.). Омск: ФГБОУ ВПО «Сибирская гос. автомобильно-дорожная акад.», 2014. С. 124-126.
- Купряшкин В.Ф., Наумкин Н.И., Чаткин М.Н. Влияние фрезерных рабочих органов на курсовую устойчивость самоходной малогабаритной почвообрабатывающей фрезы // Энергоэффективность технологий и средств механизации в АПК: материалы Междунар. науч.-практической конф. (18-21 окт. 2011 г.). Саранск: «ПРО-Движение», 2011. С. 15-23.
- Шпынев В.М., Яконовский П.А. Исследование взаимодействия щётчного рабочего органа с расстилком фрезерного торфа на операции ворошения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № S10. С. 143-146.
- Мартынов С.В., Прокопенко В.С., Капнина Э.В. Математическая модель системы управления рабочим органом строительно-дорожной машины с фрезерным барабаном // Приднепровский науч. вестн. 2018. Т. 8, № 1. С. 73-76.
- Кадыров А.С., Жунусбекова Ж.Ж., Кызылбаева Э.Ж. Разработка и исследование математической модели движения фрезерных рабочих органов землеройных машин // Труды ун-та. 2019. № 4 (77). С. 74-77.
- Ганюков А.А. Расчет на прочность фрезерного рабочего органа землеройной машины, работающей в глинистом растворе // Труды ун-та. 2007. № 1 (26). С. 58-61.
- Абдразаков Ф.К., Поваров А.В. Совершенствование геометрических параметров ножей криволинейной формы фрезерных рабочих органов // Тенденции развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: материалы междунар. науч.-практической конф. (17-18 марта 2016 г.). Саратов: ООО «Амирит», 2016. С. 18-21.
- Малоков С.В., Ступников Д.С., Шаров А.В., Ступников А.С. Многофакторная оптимизация параметров фрезерного рабочего органа лесопожарной грунтометательной ма-

шины // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9, № 3 (35). С. 172-179.

17. Stépán G. Cylindrical milling tools: Comparative real case study for process stability // CIRP Annals. 2014. Vol. 63, № 1. P. 385-388.
 18. Zhan Z. Precision milling of tungsten carbide with micro PCD milling tool // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. Vol. 77. P. 2095-2103.
 19. Fleischer J. Design and manufacturing of micro milling tools // Microsystem Technologies. 2008. Vol. 14. P. 1771-1775.
 20. Chen N. Advances in micro milling: From tool fabrication to process outcomes // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2021. Vol. 160. P. 103670.
- References*
1. Kadyrov A.S., Glotov B. N., Bestembek E.S. Determination of loading parameters of a large-diameter milling working element // News of higher educational institutions. Construction. 2013. № 1 (649). P. 101-106.
 2. Noev D.M., Kakebaev E.R., Konstantinova A.A., Sokolov D.A. Study of working elements of a vertical milling cultivator // Innovacionnaya deyatel'nost' v APK: sostoyanie, problemy, perspektivy: sb. materialov nauch.-prakticheskoy konf. (25 fevr. 2020 g.). Yakutsk: Severo-Vostochnyj feder. un-t im. M.K. Ammosova, 2020. P. 218-222.
 3. Demidenko A.I., Snigirev D.S., Vajmer E.Yu. Study of a milling working element for digging narrow slits in the ground // Vestn. SibADI. 2012. № 6 (28). P. 27-34.
 4. Sozontov A.V. Improvement of the working elements of the milling section of a sod seeder // Uluchshenie ekspluatatsionnykh pokazatelej sel'skohozyajstvennoj energetiki: materialy XVI Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (6 fevr. 2023 g.). Kirov: FGBOU VO Vyatskij gos. agrotekhnologicheskij un-t, 2023. P. 203-207.
 5. Kadyrov A.S., Kunaev V.A., Muldagali A., Kuznecov E.V. Development of the design of a milling working element for loosening solid and frozen soils // Innovacionnye tekhnologii na transporte: obrazovanie, nauka, praktika: materialy XLI Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (3-4 apr. 2017 g.). Almaty: Kazahskaya akad. transporta i kommunikacij im. M. Tynyshpaeva, 2017. P. 393-396.
 6. Andreeva E.V. On the substantiation of the parameters of the safety device of milling working bodies for the modernization of sod seeders // Engineering and technical support of agriculture: ref. zhurnal. 2009. № 4. P. 1068.
 7. Misirov M.H., Egozhev A.A., Aliev N.A., Aphudov H.A. Axial forces in milling working bodies // Energoresursoberezenie i energoeffektivnost': aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovacii: sb. nauch. tr. II Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (22-23 dek. 2023 g.). Nal'chik: Kabardino-Balkarskij gos. agrarnyj un-t im. V.M. Kokova, 2023. P. 190-193.
 8. Kadyrov A.S., Suleev B.D., Kurmasheva B.K. Analysis of loading of the milling working body // Bulletin of the Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpaeva. 2021. № 1 (116). P. 44-49.
 9. Sherstnev N.S. Technology of operation of road machines with a milling working element // Razvitie dorozhno-transportnogo i stroitel'nogo kompleksov i osvoenie strategicheski vazhnyh territorij Sibiri i Arktiki: vklad nauki: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (15-16 dek. 2014 g.). Omsk: FGBOU VPO «Sibirskaya gos. avtomobil'no-dorozhnaya akad.», 2014. P. 124-126.
 10. Kupryashkin V.F., Naumkin N.I., Chatkin M.N. The influence of milling working bodies on the directional stability of a self-propelled small-sized soil-cultivating cutter // Energoeffektivnost' tekhnologij i sredstv mekhanizacii v APK: materialy Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (18-21 okt. 2011 g.). Saransk: «PRO-Dvizhenie», 2011. P. 15-23.
 11. Shpynev V.M., Yakonovskij P.A. Study of the interaction of a brush working body with the spreading of milled peat during turning operations // Mining informational and analytical bulletin. 2009. № S10. P. 143-146.
 12. Martynov S.V., Prokopenko V.S., Kapnina E.V. Mathematical model of the control system of the working body of a road construction machine with a milling drum // Pridneprovskiy Scientific Bulletin. 2018. V. 8, № 1. P. 73-76.
 13. Kadyrov A.S., Zhunusbekova Zh.Zh., Kyzylbaeva E.Zh. Development and study of a mathematical model of the movement of milling working bodies of earthmoving machines // University Proceedings. 2019. № 4 (77). P. 74-77.
 14. Ganyukov A.A. Calculation of the strength of the milling working element of an earthmoving machine operating in a clay solution // University Proceedings. 2007. № 1 (26). P. 58-61.
 15. Abdrazakov F.K., Povarov A.V. Improving the geometric parameters of curvilinear knives of milling working elements // Tendencii razvitiya stroitel'stva, teplogazosnabzheniya i energoobespecheniya: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (17-18 marta 2016 g.). Saratov: OOO «Amirit», 2016. P. 18-21.
 16. Malyukov S.V., Stupnikov D.S., Sharov A.V., Stupnikov A.S. Multifactor optimization of the parameters of the milling working element of a forest fire soil-throwing machine // Forestry Engineering Journal. 2019. T. 9, № 3 (35). P. 172-179.
 17. Stépán G. Cylindrical milling tools: Comparative real case study for process stability // CIRP Annals. 2014. Vol. 63, № 1. P. 385-388.
 18. Zhan Z. Precision milling of tungsten carbide with micro PCD milling tool // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. Vol. 77. P. 2095-2103.
 19. Fleischer J. Design and manufacturing of micro milling tools // Microsystem Technologies. 2008. Vol. 14. P. 1771-1775.
 20. Chen N. Advances in micro milling: From tool fabrication to process outcomes // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2021. Vol. 160. p. 103670.