

УДК 630\*332.2.001.57

UDC 630\*332.2.001.57

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ  
ФРЕЗЫ С ГИДРОПРИВОДОМ ДЛЯ  
ПОНИЖЕНИЯ ПНЕЙ  
ТВЕРДОЛИСТВЕННЫХ ПОРОД НА  
ЛЕСНЫХ УЧАСТКАХ****STUDY OF WORKFLOWS WITH HYDRAULIC  
CUTTERS TO LOWER HARDWOOD STUMPS  
AT FOREST SITES**

Попиков Пётр Иванович  
д.т.н., профессор  
*Воронежская государственная лесотехническая  
академия, Воронеж, Россия*

Popikov Petr Ivanovich  
Dr.Sci.Tech., professor  
*Voronezh State Forestry Academy, Voronezh, Russia*

В статье представлены динамические  
характеристики фрезы для удаления пней на  
вырубке

In the article, the dynamic characteristics of  
frictiondual-tillage of a wood soil-cultivating mill as  
object of automatic control are presented

Ключевые слова: ФРЕЗА, ДИНАМИКА  
ГИДРОПРИВОД, ПЕНЬ

Keywords: MILL, FRICTIONDUAL-TILLAGE,  
DYNAMICS

В соответствии со статьей 62 лесного кодекса РФ необходимым условием для создания лесных культур является подготовка лесного участка, которая включает сплошную или полосную расчистку площади от валежной древесины, стволов усохших деревьев, корчевку пней или понижение их высоты до уровня, не препятствующего движению машино-тракторным агрегатам.

В настоящее время для удаления пней на вырубках в основном применяются различные корчевальные и фрезерные машины. При работе корчевателей вместе с пнём извлекается большая масса земли, происходит перемешивание почвенного горизонта, образуется подпневая яма, что влечет нарушение биогеоценоза. Измельчение пней фрезерными машинами позволяет понижать пни при минимальном воздействии на почву. Однако существующие фрезерные машины с громоздким механическим приводом от раздаточной коробки трактора предназначены в основном для понижения пней хвойных и мягколиственных пород, поэтому при фрезеровании пней твердолиственных пород их эффективность снижается из-за высоких динамических нагрузок.[2].

В связи с этим возникает необходимость создания нового рабочего органа для понижения пней твердолиственных пород при обеспечении

высокой эффективности и минимальной энергоемкости рабочего процесса. Наиболее перспективным для этих целей является фреза с гидроприводом и обоснованными параметрами и компоновкой скалывающих и подрезных ножей, однако теоретических и экспериментальных исследований рабочих процессов о ее взаимодействии с пнями твердолиственной древесины проведено недостаточно.

Предлагается новый рабочий орган в виде усеченного конуса с гидроприводом, с новой расстановкой комплексов ножей (рисунок 1) (пат. на пол. модель № 78032). Комплекс состоит из подрезного ножа, установленного относительно скалывающего ножа с выступом в направлении подачи на расстоянии 2...4 мм, причем пары ножей смещены друг относительно друга по винтовой линии с перекрытием. Это позволяет повысить устойчивость фрезы к поломкам за счет более равномерного распределения нагрузки. [4]

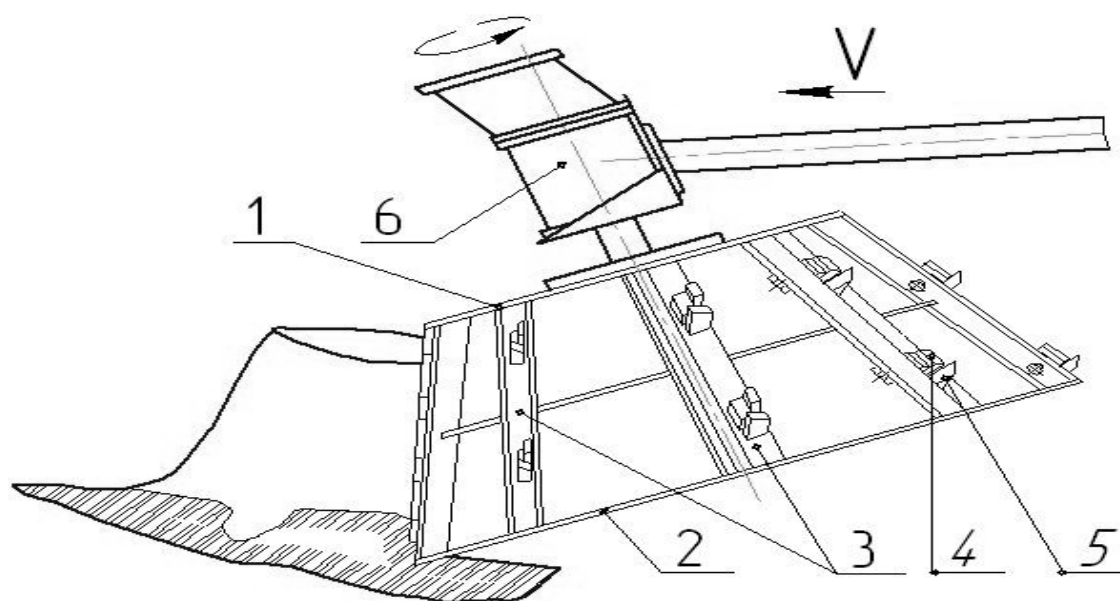


Рисунок 1 – Схемы рабочего органа (а) и крепления подрезного и скалывающего ножей (б): 1 – верхнее основание, 2 – нижнее, 3 – балки, 4 – скалывающий нож, 5 – подрезной нож, 6 – гидромотор, 7,8 – клинья, 9 – болты.

Составлены и проанализированы дифференциальные уравнения, описывающие процесс фрезерования пня новым рабочим органом и расход рабочей жидкости гидропривода:

$$\left\{ \begin{aligned} J_{np} \cdot \frac{dw}{dt} &= \frac{h_n q_m p}{2ph_0} - k_M \frac{dN_p}{dt} \left\{ r_{под} \left[ k_{под} \cdot \left( 0,12 \cdot \frac{v_{под}}{2pw} + \left( \frac{\mu_{под}}{\operatorname{tg} \delta_n} + 1 \right) c_{под} \cdot 0,12 \cdot \frac{v_{под}}{2pw} \right) \right] + \right. \\ &+ r_{скл} \left[ \frac{2}{p} r H_t (p - b) \left( \cos \left( a + \frac{b}{2} \right) + f_{тр} \sin \left( a + \frac{b}{2} \right) \right) + L \sigma_{см.r} (\sin d + f_{тр} \cos d) + \right. \\ &\left. \left. + \frac{1}{2} H_r r (\cos a + \cos d) (f_{тр} \operatorname{ctg} a - 1) \right] \right\} R_p \cdot \operatorname{sign}(w) - k_\delta w; \\ \frac{dp}{dt} &= \frac{1}{K_p} \cdot (q_n n_n - q_m w - a_y p). \end{aligned} \right.$$

где  $J_{np}$  – приведенный момент инерции вращающихся масс к валу гидромотора, включающий момент инерции роторной группы гидромотора и момент инерции рабочего органа, кг·м<sup>2</sup>;  $w$  – угловая скорость вращения вала гидромотора, с<sup>-1</sup>;  $t$  – время, с;  $\eta_n$  – полный КПД гидромотора;  $\eta_0$  – объёмный КПД гидромотора;  $q_m$  – рабочий объём гидромотора, м<sup>3</sup>/об;  $p$  – давление рабочей жидкости в гидросистеме, Па;  $k_M$  – коэффициент, определяющий силу сопротивления при удалении элементарного куба, с;  $N_p$  – количество удаленных элементарных кубов древесины пня;  $r_{под}$  и  $r_{скл}$  – коэффициенты, определяющие влияние сил  $F_{под}$  и  $F_{скл}$  со стороны подрезного и скалывающего ножей, м;  $k_{под}$  – удельное сопротивление перерезанию, Н/м<sup>2</sup>;  $h_{под} = 0,12v_{под}/2\pi\omega$  – подача на режущий нож, м;  $v_{под}$  – скорость подачи, м/с;  $\mu_{под}$  – коэффициент трения древесины о нож;  $\delta_n$  – угол резания передней режущей кромки;  $c_{под}$  – коэффициент пропорциональности, постоянный для данной обрабатываемой древесины, Н/м<sup>2</sup>;  $\rho$  – радиус округления лезвия, м;  $H_t$  – статическая твердость древесины в тангенциальном направлении, Н/м<sup>2</sup>;  $\beta$  – угол заострения;  $\alpha$  – задний угол;  $f_{тр}$  – коэффициент трения древесины о режущий элемент,  $L$  – зона соприкосновения передней грани ножа с древесиной, м;  $\sigma_{см.r}$  – предел прочности древесины на смятие поперек волокон в радиальном направлении, Н/м<sup>2</sup>;  $\delta$  – угол резания;  $H_r$  – статическая твердость древесины в радиальном направлении, Н/м<sup>2</sup>;  $R_p$  – радиус резания, м;  $\operatorname{sign}(\omega)$  – функция, возвращающая знак  $\omega$ ;  $k_\delta$  – коэффициент сопротивления трения при вращательном движении фрезы, Н·м·с/рад;  $K_p$  – коэффициент податливости упругих элементов гидропривода, м<sup>5</sup>/Н;  $q_n$  – рабочий объём насоса, м<sup>3</sup>/об;  $n_n$  – частота вращения насоса, с<sup>-1</sup>;  $a_y$  – коэффициент утечек, м<sup>5</sup>/(с·Н).

В результате компьютерного эксперимента получены зависимости максимальной силы резания  $F_{\max}$  и работы резания  $A$  от угла резания  $\delta_{\text{п}}$ . В данной серии экспериментов изменяли угол резания  $\delta_{\text{п}}$  от  $10^\circ$  до  $70^\circ$  с шагом  $10^\circ$ . Убывающий вид зависимости  $F_{\max}(\delta_{\text{п}})$  и  $A(\delta_{\text{п}})$  объясняется тем, что при малых значениях угла резания  $\delta_{\text{п}}$  передняя режущая кромка расположена почти перпендикулярно к направлению подачи древесины на нож, и сила сопротивления при этом велика (рисунок 4), минимальные значения  $F_{\max}(\delta_{\text{п}})$  и  $A(\delta_{\text{п}})$  находятся при угле резания  $\delta_{\text{п}} > 30^\circ$ . [5].

Проведена серия компьютерных экспериментов, в рамках которых задний угол скалывающего ножа  $\alpha_{\text{ск}}$  принимал следующие значения:  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $50^\circ$ . При увеличении  $\alpha_{\text{ск}}$  снижается максимальная сила на комплексе ножей и работа по измельчению пня вследствие более эффективного резания древесины (рисунок 5).

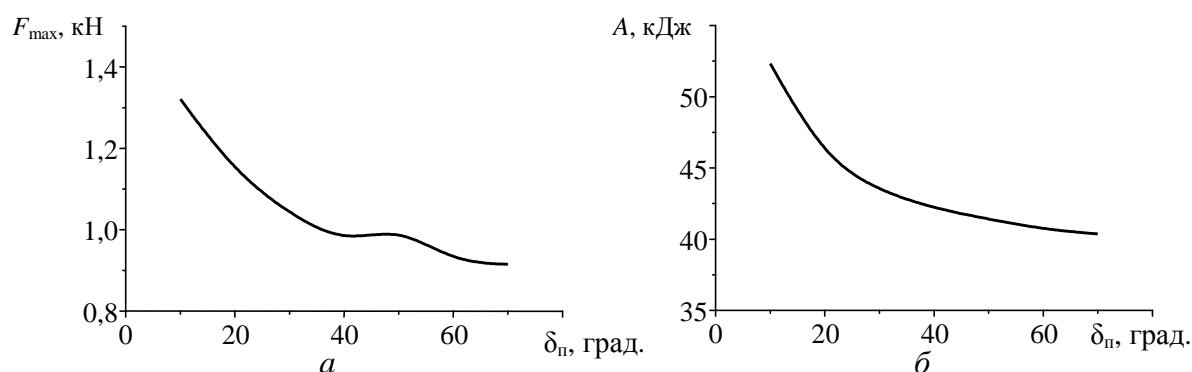


Рисунок 4 – Зависимости максимальной силы  $F_{\max}$  резания (а) и работы  $A$  измельчению пня (б) от угла резания подрезного ножа  $\delta_{\text{п}}$

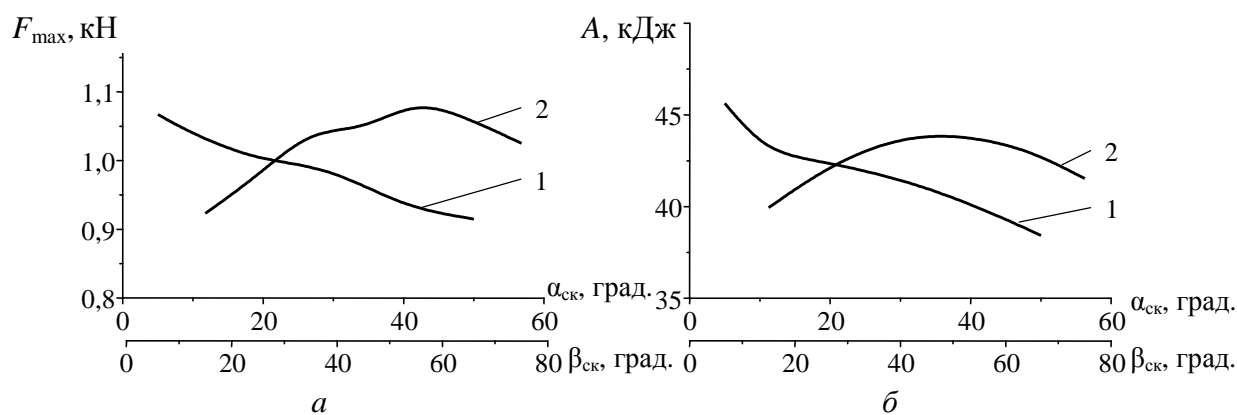


Рисунок 5 – Зависимости максимальной силы  $F_{\max}$  на комплексе (а) и работы  $A$  по измельчению пня (б) от заднего угла скальвающего ножа  $\alpha_{\text{ск}}$  (1) и угла заострения скальвающего ножа  $\beta_{\text{ск}}$  (2)

В этой серии экспериментов изменяли угол заострения скальвающего ножа  $\beta_{\text{ск}}$  от  $15^\circ$  до  $75^\circ$  с шагом  $10^\circ$ . Зависимости  $F_{\max}(\beta_{\text{ск}})$  и  $A(\beta_{\text{ск}})$  имеют максимум в области  $40 < \beta_{\text{ск}} < 55^\circ$  (рисунок 5). Низкие значения  $F_{\max}$  и  $A$  в области малых  $\beta_{\text{ск}}$  можно объяснить тем, что при малых  $\beta_{\text{ск}}$  проекция силы отделения древесины на продольное направление невелика.

Проведена серия из восьми компьютерных экспериментов, в рамках которой скорость подачи  $v_{\text{под}}$  изменялась от 0,005 до 0,04 м/с с шагом в 0,005 м/с. Зависимость максимальной силы на комплексе ножей от скорости подачи  $F_{\max}(v_{\text{под}})$  резко возрастает после  $v_{\text{под}} = 0,025$  м/с, имеет приближенно квадратичный характер  $F_{\max}(v_{\text{под}}) \sim v_{\text{под}}^2$  (рисунок 6, а). Увеличение работы  $A$  по измельчению пня с увеличением  $v_{\text{под}}$  (рисунок 6, б) имеет приближенно линейный характер от 30 до 60 кДж. Зависимости влияния радиуса округления лезвия скальвающего ножа  $\rho_{\text{ск}}$  на максимальную силу  $F_{\max}$  и работу  $A$  по измельчению пня являются линейными и сильно возрастающими (рисунок 6).

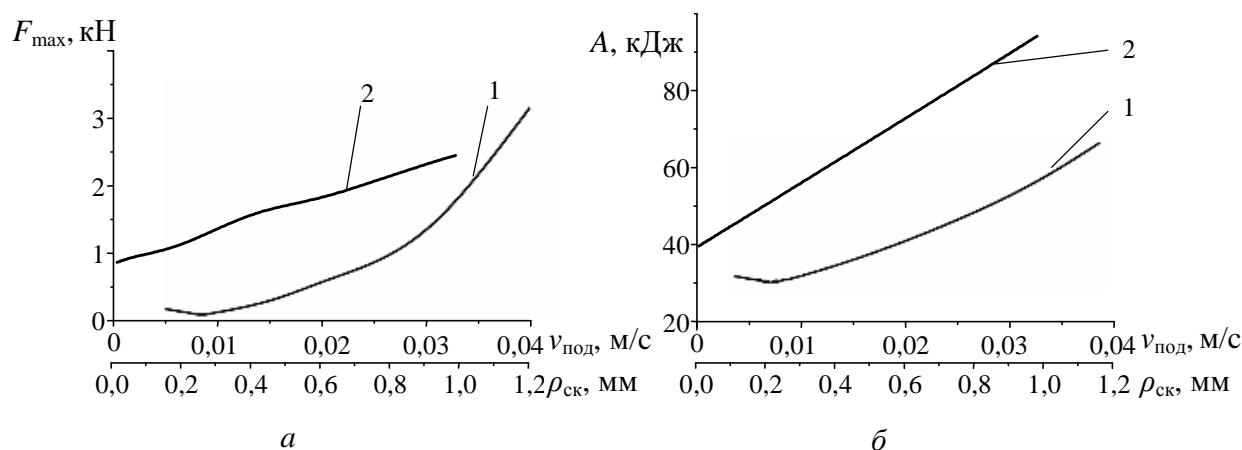


Рисунок 6 – Зависимости максимальной силы  $F_{\max}$  на комплексе (а) и работы  $A$  по измельчению пня (б) от скорости подачи фрезы  $v_{\text{под}}$  (1) и радиуса округления лезвия скальвающего ножа  $\rho_{\text{ск}}$  (2)

Исследовалось влияние механических свойств древесины на силу резания  $F_{\max}$  и работу измельчения  $A$ . Для легкообрабатываемой древесины (сосна) максимальная сила на комплексе меняется от 0,887 кН до 1,257 кН, для труднообрабатываемой древесины (дуб) работа по измельчению пня изменяется от 36,23 до 54,54 кДж соответственно. Таким образом, при обработке различных типов древесины динамические и энергетические параметры могут изменяться на 20–30 % .

Проведенный анализ привел к заключению, что на эффективность фрезерования наибольшее влияние оказывают следующие параметры:

- кинематические параметры (скорость подачи фрезерного рабочего органа и объем гидромотора, определяющий скорость вращения фрезы);
- параметры скальвающего ножа (задний угол и угол заострения ножа).

В связи с этим решены следующие две задачи оптимизации.

$$\begin{cases} F_{\max}(v_{\text{под}}, q_m) \rightarrow \min; \\ A(v_{\text{под}}, q_m) \rightarrow \min; \end{cases} \quad \begin{cases} F_{\max}(a_{\text{ск}}, b_{\text{ск}}) \rightarrow \min; \\ A(a_{\text{ск}}, b_{\text{ск}}) \rightarrow \min. \end{cases}$$

Важным преимуществом двухфакторной оптимизации является возможность графически изобразить поверхность отклика и провести ее

визуальный анализ (рисунок 7).

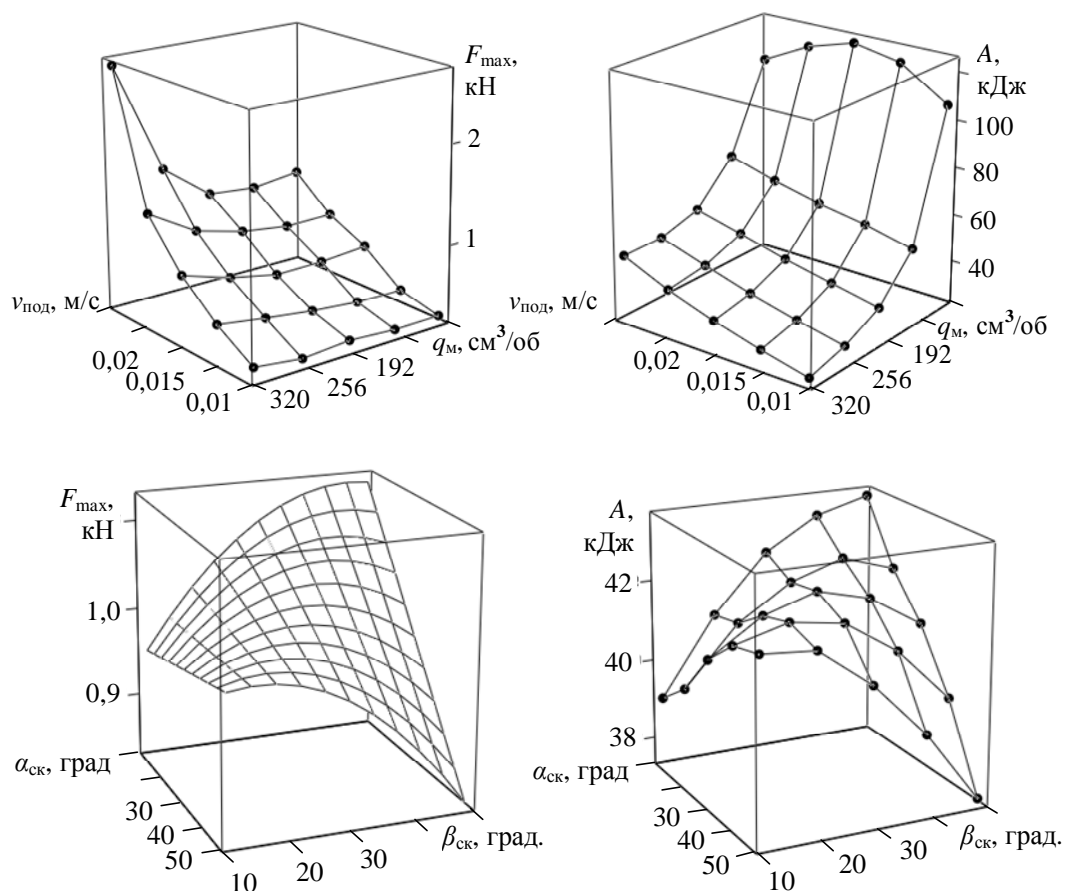


Рисунок 7 – Поверхности отклика к оптимизации параметров фрезерной машины

Анализируя каждую из поверхностей отклика, представленных с помощью линий уровня, можно условно разделить факторное пространство на две области: благоприятную (заштрихована на рисунках 8 – 9) и неблагоприятную. В качестве границы между благоприятной и неблагоприятной областями экспертным путем выбирается некоторая линия уровня. При этом учитывается, что благоприятная область должна содержать минимальные значения критерия.

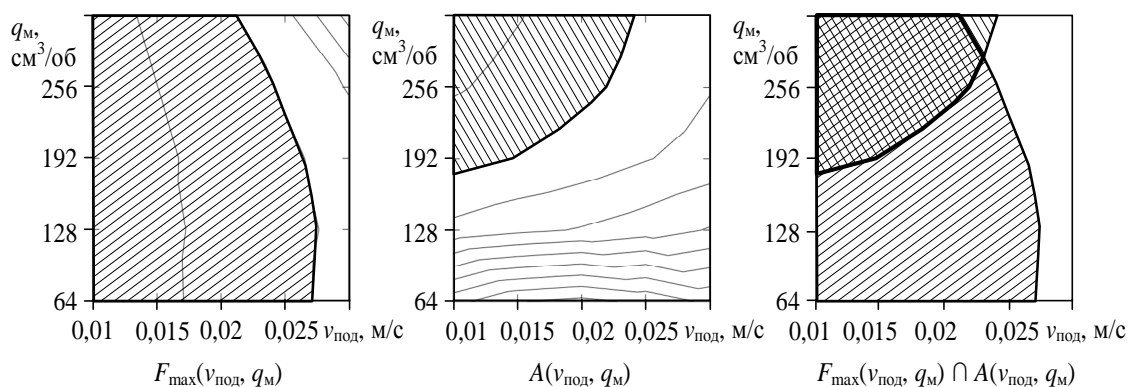


Рисунок 8 – Благоприятные области факторного пространства ( $v_{под}$ ,  $q_M$ ) (заштрихованы) на поверхностях отклика, представленных линиями уровня\

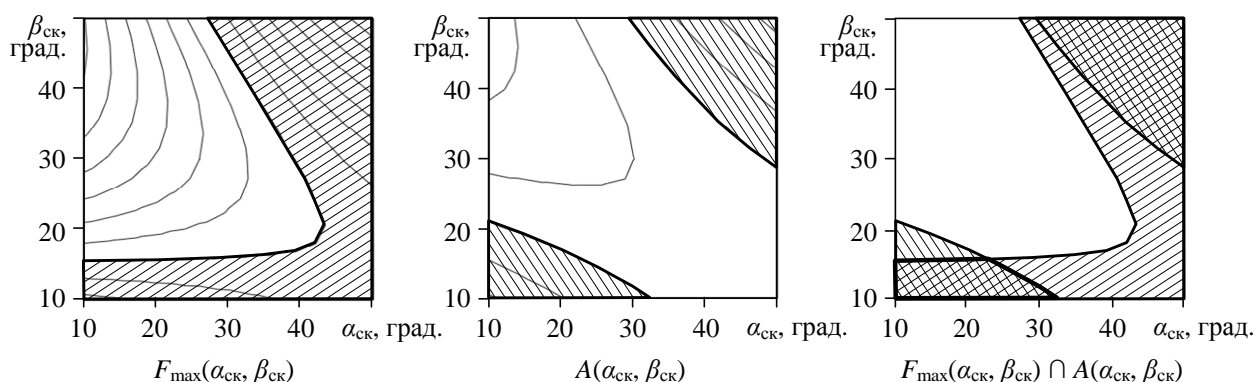


Рисунок 9 – Благоприятные области факторного пространства ( $\alpha_{ск}$ ,  $\beta_{ск}$ ) (заштрихованы) на поверхностях отклика, представленных линиями уровня

В результате проведенной оптимизации выявлено, что оптимальные сочетания скорости подачи фрезы и объема гидромотора находятся в интервалах параметров: от 0,01 до 0,025 м/с для  $v_{под}$  и от  $192 \cdot 10^{-6}$  до  $256 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/об для  $q_M$ . Оптимальные сочетания заднего угла и угла заострения скалывающего ножа находятся в интервалах углов  $\alpha_{ск} = 35^{\circ} \dots 40^{\circ}$ ,  $\beta_{ск} = 40^{\circ} \dots 45^{\circ}$ . Предложены две новые схемы расположения комплексов ножей на рабочем органе, повышающие устойчивость фрезы к поломкам за счет более равномерного распределения нагрузок по ножам. Двухзаходная и синусоидальная схемы снижают максимальную силу на ноже на 40 % и 30 % соответственно[3].



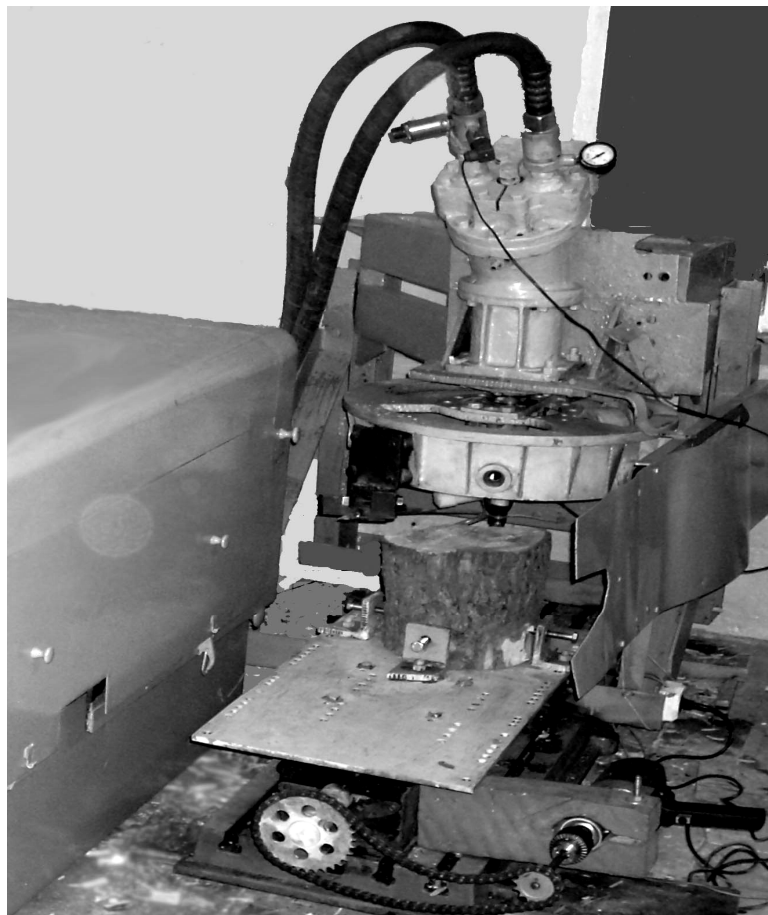


Рисунок 10 Общий вид лабораторной установки

Для лабораторных исследований рабочих процессов новой конструкции рабочего органа фрезерной машины для удаления пней разработан лабораторный стенд, включающий механизмы резания и подачи, закрепленные на станине 1(рис.10). Механизм резания состоит из рабочего органа 2 с закрепленным комплексом ножей 4, с приводом от гидромотора 5. Механизм подачи включает в себя подвижную платформу 6 с закрепленным пнем 7, с приводом от электродвигателя 8. Гидромотор приводится во вращение гидростанцией 10, которая подает рабочую жидкость через трубопроводы. Изменение давления в подводящей гидромагистрали отслеживается датчиком 9, а угловая скорость – датчиком 3, подключенным к компьютеру.

Проведена серия лабораторных экспериментов для изучения влияния угла заострения  $\beta_{ск}$  скальвающего ножа при значениях  $35^{\circ}$ ,  $40^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $50^{\circ}$  на

удельную работу  $A_y$  по измельчению пня с прямой режущей кромкой (рисунок 11 а). Зависимость  $A_y(\beta_{ск})$  имеет максимум при  $\beta_{ск} = 45^\circ$ . В области низких значений  $A_y(\beta_{ск})$  могут реализовываться два различных механизма отделения древесины: при  $\beta_{ск} < 45^\circ$  происходит слоевое отделение древесины, при значениях же  $\beta_{ск} > 50^\circ$  происходит дробление древесины. Угол заострения скальывающего ножа  $\beta_{ск}$  необходимо выбирать, исходя из механизма отделения древесины (слоевой или фрагментарный).

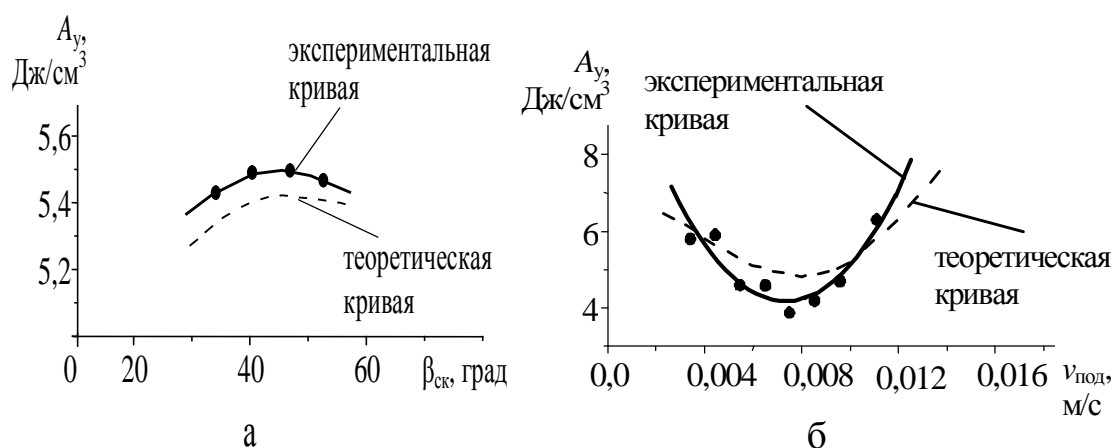


Рисунок 11 – Влияние угла заострения скальывающего ножа  $\beta_{ск}$  (а) и скорости подачи  $v_{под}$  (б) на работу  $A_y$  по измельчению пня

Проведена серия лабораторных экспериментов с различными скоростями подачи: 0,00340, 0,00443, 0,00546, 0,00650, 0,00750, 0,00855, 0,00958, 0,011 м/с (рисунок 11 б). Экспериментальные зависимости  $A_y(v_{под})$  близки к теоретической зависимости, в частности, в эксперименте подтверждается вогнутый характер теоретической кривой в области малых значениях скорости подачи  $v_{под}$ . При малых значениях  $v_{под}$  (от 0,004 до 0,007 м/с) древесина срезается тонкими слоями. При этом силы резания невелики, однако силы трения при пересчете на удельный объем оказываются значительными из-за большого количества срезаемых слоев. При больших значениях  $v_{под}$  (от 0,007 до 0,01 м/с) срезаются толстые слои древесины, при этом удельный вклад сил трения мал, однако силы резания велики, так как необходимо преодолевать изгибающие и расклинивающие

свойства толстых слоев. Результаты эксперимента хорошо согласуются с результатами математического моделирования: максимальное расхождение составляет не более 10 % абсолютной величины.

Определена технико-экономическая эффективность экспериментальной машины для удаления пней.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Драпалюк, М. В. Оценка энергоемкости рабочего процесса машины для понижения пней [Текст] / М. В. Драпалюк, П. И. Попиков, А. И. Цуриков, Е. В. Беликов // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Технические науки. – 2007. – № 5 – С. 76-82.

2 Попиков П.И. Повышение эффективности гидрофицированных машин при лесовосстановлении на вырубках. Воронеж: ВГЛТА, 2001. - 156 с.

3. Попиков, П. И. Оптимальное расположение ножей на рабочем органе машины для удаления пней [Текст] / П. И. Попиков, Е. В. Беликов, В. В. Посметьев // Вестник КрасГАУ. – 2009. – №. 12. – С. 170-173.

4. Пат. на полезную модель 78032 РФ, МПК7 А01G 23/06. Устройство для дробления пней [Текст] / И. М. Бартенев, М. В. Драпалюк, П. И. Попиков, Е. В. Беликов ; заявитель и патентообладатель ВГЛТА. – № 2008117621/22 ; заявл. 04.05.08 ; опубл. 20.11.08, Бюл. № 32. – 2 с.

5. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2009610415 РФ. Программа моделирования работы фрезерной машины для удаления пней [Текст] / Е. В. Беликов, П. И. Попиков, В. В. Посметьев; правообладатель ГОУ ВПО «Воронеж. гос. лесотехн. акад.». – №2008615424 ; заявл. 21.11.2008 г. ; зарег. 19.01.2009.