

УДК 630*332.2.001.57

UDC 630*332.2.001.57

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБРЕЗКИ
КРОН ДЕРЕВЬЕВ МАШИНОЙ
МАНИПУЛЯТОРНОГО ТИПА С ДИСКОВОЙ
ПИЛОЙ**

**MATHEMATICAL MODEL OF
MANAGEMENT OF SCRAP PROCESS OF
CRONES OF TREES BY MANIPULATOR
WITH A DISK SAW**

Попиков Пётр Иванович
д.т.н., профессор

Popikov Peter Ivanovich
Dr.Sci.Tech., professor

Драпалюк Михаил Валентинович
д.т.н., профессор

Drapaluk Michael Valentinovich
Dr.Sci.Tech., professor

Попиков Виктор Петрович
к.т.н., старший преподаватель
*Воронежская государственная лесотехническая
академия, Воронеж, Россия*

Popikov Viktor Petrovich
Cand.Tech.Sci., senior teacher
*Voronezh State Academy of Forestry and
Technologies, Voronezh, Russia*

В статье представлена математическая модель
управления взаимодействия рабочего органа
обрезчика с ветвями деревьев. Выполнена
оптимизация конструктивных параметров
машины для обрезки деревьев

In this article, the mathematical model of
management of interaction of working body of the
cutter with branches of trees is submitted.
Optimization of design data of the machine for scrap
of trees is executed

Ключевые слова: ОБРЕЗКА ВЕТВЕЙ,
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Keywords: SCRAP OF BRANCHES,
MATHEMATICAL MODEL

В общем объеме лесохозяйственных работ важное место занимает переход к внедрению промышленных методов лесовыращивания на основе лесного селекционного или сортового семеноводства. Лесным кодексом РФ предусматривается создание постоянных лесосеменных участков и лесосеменных плантаций. Одним из основных направлений реализации федеральной целевой программы «Развитие лесного семеноводства на период 2009-2020 годы» является обеспечение выполнения всего комплекса мероприятий по содержанию имеющихся лесосеменных объектов и повышение их урожайности за счет лесоводственных и агротехнических уходов, включающих обрезку кроны, внесение удобрений и др.

Существующие конструкции машин для обрезки ветвей деревьев обеспечивают высоту обрезки не более 4,5 м, в то время как на лесосеменных плантациях и участках требуемая высота обрезки 7-8 м. В настоящее время обрезка ветвей деревьев лесосеменных плантаций производится рабочими, поднятыми гидроподъемниками в крону деревьев,

с помощью ручных ножовок и бензопил. Любые повреждения при обрезке вредны для дерева и способствуют возникновению различных инфекционных болезней. Поэтому при обрезке крон необходимо обеспечивать качественный срез ветвей без задиров коры и расщепов. Задача повышения качества и производительности обрезки крон деревьев вызывает острую необходимость в разработке средств механизации этого сложного технологического процесса.

Из анализа исследований параметров существующих технических устройств для обрезки крон деревьев следует, что наиболее перспективными являются машины манипуляторного типа, рабочим органом которых являются дисковые пилы с гидроприводом. Однако рабочие процессы и параметры технологического оборудования машин для обрезки крон деревьев лесосеменных плантаций недостаточно исследованы, нет четкого представления о том, какими должны быть параметры гидропривода и зубьев дисковых пил для качественной обрезки крон деревьев.

Предлагается новый рабочий орган в виде дисковой пилы с гидроприводом, смонтированный на манипуляторе посредством шарнирного соединения маятникового рычага с удлинителем рукояти, поворот которого осуществляется поворотным гидродвигателем (ротатором) на угол более 180° , что расширяет зону действия манипулятора и его технологические возможности (рисунок 1) (свид-во на пол. модель № 30057). На маятниковом рычаге предусмотрена установка V-образного кронштейна для устранения зажима пилы и удаления срезанных ветвей из кроны дерева. Кроме того, для повышения качества обрезки предложена односторонняя заточка длинной и короткой боковых режущих кромок зубьев дисковой конической пилы и односторонний развод зубьев в сторону отделяемой части ветви (рисунок 1) (патент изобретения № 2374824).

При обрезке ветвей деревьев резание производится длинной боковой режущей кромкой, которая имеет форму ножевого секатора, поэтому происходит как бы силовое резание, а на ветви остается участок с гладким срезом, так как задний угол близок к нулю, при этом деформируется только отделяемая часть ветвей. При ежегодной подрезке однолетних побегов семенных деревьев и кустарников используется эта же пила, но с обратным направлением вращения. Резание в этом случае производится короткой боковой режущей кромкой, которая не дает отклоняться побегам в процессе срезания в сторону. При математическом моделировании устройство для обрезки ветвей рассматривалось как сложная многосвязная система, обладающая большим количеством параметров и погруженная при этом в среду с целой совокупностью параметров, не являющихся частью разрабатываемой системы.

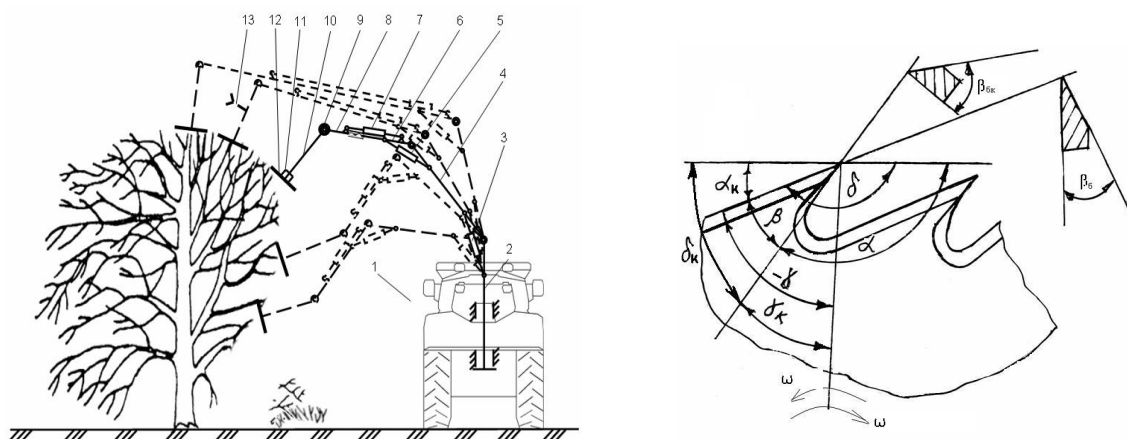


Рисунок 1 - Схема машины для обрезки крон деревьев: 1 – базовая машина; 2 – поворотная колонна; 3 – гидроцилиндр стрелы; 4 – стрела; 5 – гидроцилиндр рукояти; 6 – рукоять; 7 – гидроцилиндр удлинителя; 8 – удлинитель рукояти с винтовой парой; 9 – гидродвигатель (ротатор); 10 – маятниковый рычаг; 11 – гидромотор пилы; 12 – дисковая пила; 13 – V-образный упор.

При этом окружающая обрезчик среда и сам обрезчик, в зависимости от комбинации своих внутренних параметров, взаимодействуют друг с другом, оказывая влияние на качественные показатели процесса подрезки корней.

При моделировании все факторы, оказывающие влияние на технологический процесс обрезки ветвей, были разделены на первичные (к которым можно отнести ветви, вершины, сучья т.д.) и вторичные (к которым можно отнести технологические особенности обрезки ветвей, механическое воздействие рабочих органов на ветви, а также конструктивные особенности обрезчика).

Для решения задачи моделирования обрезчика как механической системы был проведен анализ рабочего процесса обрезки ветвей с учётом факторов, оказывающих влияние на технологический процесс обрезки ветвей. Результаты анализа представлены в виде блок-схемы на рисунке 2.

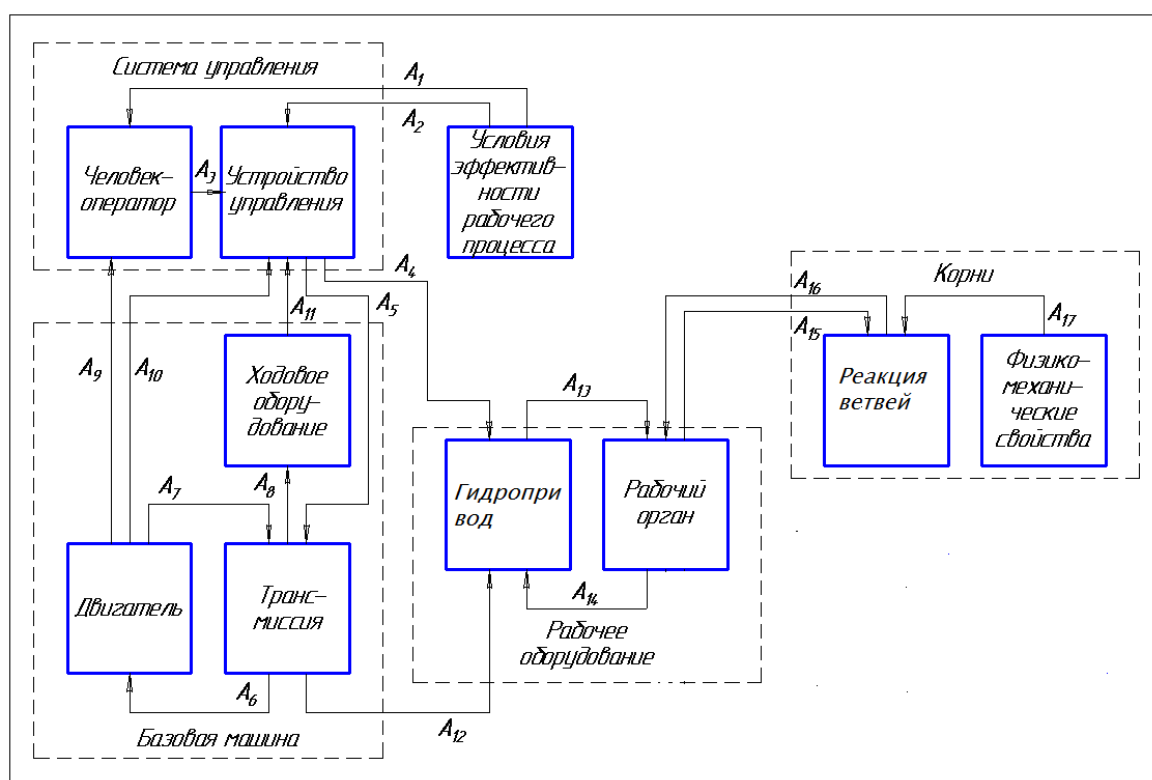


Рисунок 2. Блок-схема динамической системы рабочего процесса обрезчика

Обрезчик является сложной динамической системой, состоящей из взаимодействующих между собой подсистем: базовой машины, системы управления, рабочего оборудования, деревьев и перерезаемых ветвей.

Базовая машина представлена подсистемами: двигатель, трансмиссия и ходовое оборудование. Система управления представлена подсистемами:

человек-оператор и устройство управления. Рабочее оборудование представлено подсистемами: гидропривод и рабочий орган. Ветви представлены подсистемами: реакция ветвей на рабочий орган и физико-механические свойства ветвей.

При работе устройства для обрезки ветвей человек-оператор (или автоматическое устройство), исходя из условий эффективности рабочего процесса (A1, A2), оказывает влияние (A3) на устройство управления и формирует управляющие воздействия на трансмиссию (A5) базовой машины и на гидропривод (A4) рабочего оборудования.

Подсистема базовой машины, воспринимая воздействия от устройства управления, перераспределяет энергию между двигателем и трансмиссией (A6, A7), оказывая при этом влияние на ходовое оборудование (A8) и человека-оператора (A9). Ходовое оборудование, в свою очередь, воздействует (A11) на устройство управления, на которое одновременно может оказывать влияние и двигатель (A10) базовой машины.

Подсистема рабочего оборудования, воспринимая воздействия от устройства управления, передаёт энергию от гидропривода рабочему органу и в обратном направлении (A13, A14). На гидропривод может оказывать влияние и трансмиссия (A12) базовой машины.

Подсистема обрезаемых ветвей воспринимают воздействия от рабочего органа (A15), оказывая на него ответное влияние (A16). При этом реакции ветвей зависят от их физико-механических свойств (A17).

На основе анализа рабочего процесса подрезки ветвей была составлена математическая модель данного процесса. При моделировании взаимодействия пилы с ветвью согласно методу конечных элементов участок ветви представляется в виде совокупности большого количества элементарных кубов малого размера d . Ветвь в модели первоначально

где, r_z – радиус пильного диска; $N_{зуб}$ – количество зубьев на диске; $\Delta r = 1,06858 \cdot 2\pi / N_{зуб} \cdot r_z$ – высота зуба; $\Delta\varphi = 0,38893 \cdot 2\pi / N_{зуб}$ – угловое расстояние между основанием и краем зуба; $x_{МС}$ и $y_{МС}$ – координаты точки 4, определяемые методом Монте-Карло в программе, реализующей модель; b_z – толщина диска.

Составлены и проанализированы дифференциальные уравнения, описывающие расход рабочей жидкости гидропривода и рабочий процесс резания дисковой пилой при повороте маятникового рычага поворотным гидродвигателем:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dp}{dt} &= \frac{1}{K_p} (q_n \cdot \omega_n - q_m \omega - a_y p - q_z \cdot j_n); \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J_{пр}} \left\{ \frac{\eta_n q_m P}{2\pi\eta_0} - k_M \frac{dN_p}{dt} \left[k_n h_{под} + \left(\frac{\mu}{\text{tg } \delta} + 1 \right) c_{рез} h_{под}^2 \right] R_p \text{sign} (\omega\omega - k_\omega \omega) \right\}, \end{aligned} \right.$$

(2)

где p – давление рабочей жидкости в гидросистеме, Па; t – время, с; K_p – коэффициент податливости упругих элементов гидропривода, м⁵/Н; q_n – рабочий объём насоса, м³/об; q_m – рабочий объём гидромотора, м³/об; ω_n – угловая скорость вращения насоса, с⁻¹; ω – угловая скорость вращения вала гидромотора, с⁻¹; a_y – коэффициент утечек, м⁵/(Нс); q_z – рабочий объём ротатора, м³/об; φ_n – угол поворота маятника, рад.; $J_{пр}$ – приведенный момент инерции вращающихся масс к валу гидромотора, включающий момент инерции роторной группы гидромотора и момент инерции рабочего органа, кг·м²; η_n – полный объёмный КПД гидромотора; η_0 – объёмный КПД гидромотора; k_M – коэффициент, определяющий силу сопротивления при удалении элементарного куба, с; N_p – количество

удаленных элементарных кубов ветви; $h_{под} = 0,12 \frac{v_{под}}{2\pi\omega}$ – подача на режущий зуб, м; $v_{под}$ – скорость подачи, м/с; k_p – удельная сила резания, Н/м²; μ – коэффициент трения древесины о зуб; δ – угол резания передней режущей

кромки; срез – коэффициент пропорциональности, постоянный для данной обрабатываемой древесины; R_p – радиус резания; k_ω – коэффициент вязкого сопротивления резанию.

Система дифференциальных уравнений (2) решена методом численного интегрирования – модифицированным методом Эйлера-Коши. Для решения системы дифференциальных уравнений, положенной в основу модели, и для проведения различных компьютерных экспериментов с моделью составлена компьютерная программа на языке Object Pascal в интегрированной среде программирования Borland Delphi 7.0. На экран выводятся графики угловой скорости и давления на гидромоторе пилы.

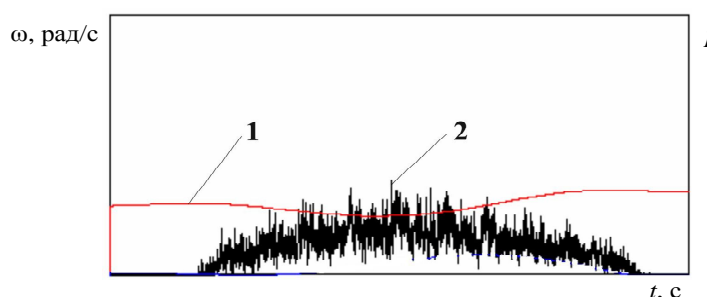


Рисунок 5 – Характер зависимостей: 1 – угловой скорости вращения диска ω от времени t , 2 – давления на гидромоторе P от времени t

Зависимость силы резания F_{max} от скорости подачи ($v_{под}$) имеет приближенно линейный характер на участках от 0,01 до 0,05 м/с (рисунок 6, а). Возрастающий характер зависимости можно объяснить тем, что с увеличением скорости подачи более 0,06 м/с возрастает объем древесины, срезаемый пилой в единицу времени dV_d/dt , что может привести к зажиму пилы в пропиле. Увеличение работы A срезания ветви с увеличением $v_{под}$ (рисунок 6, б) можно объяснить тем, что с увеличением скорости подачи возрастают силы сопротивления резанию.

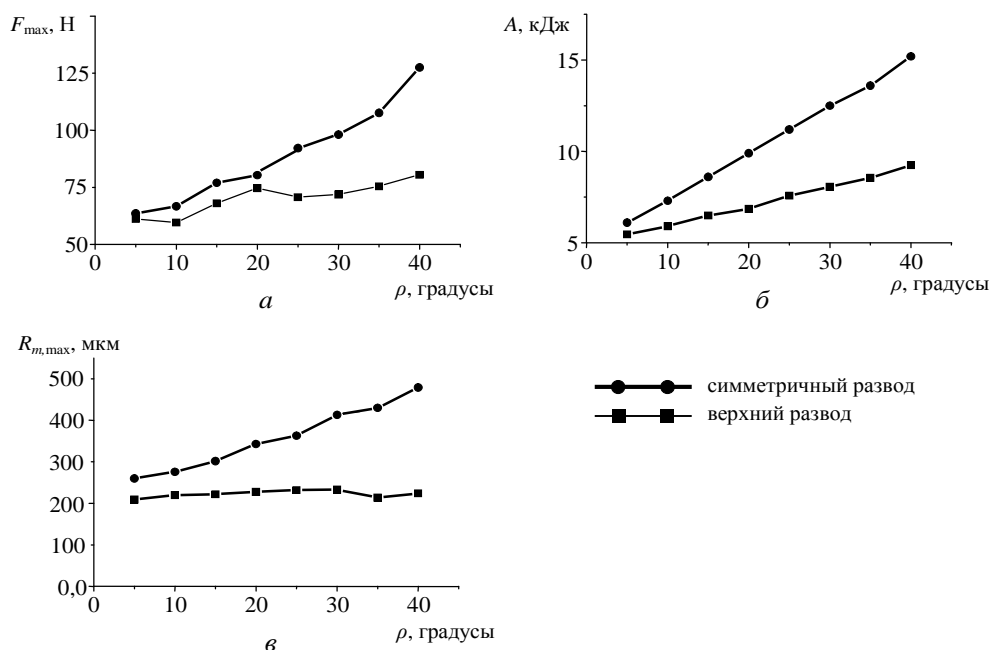


Рисунок 6 – Зависимости максимальной силы резания на зубе F_{max} (а), работы A срезания ветви (б) и шероховатости среза $R_{m,max}$ (в) от угла развода зубьев пилы ρ

Проведена серия компьютерных экспериментов с различными схемами развода зубьев пилы: симметричный развод – зубья разведены через один вверх и вниз на одинаковый угол ρ от плоскости диска; верхний развод – зубья с нечетными номерами не отклонены от плоскости диска, а зубья с четными – отклонены вверх на угол ρ . Во всех сериях угол ρ изменяли от 5° до 40° с шагом 5° . Возрастающий характер зависимостей $F_{max}(\rho)$ и $A(\rho)$ для двух схем развода можно объяснить тем, что с увеличением ρ возрастает как ширина пропила, так и интенсивность воздействия зубьев на древесину в области резания (рисунок 6 а, б, в). При одностороннем разводе наблюдается снижение энергоемкости пиления по сравнению с симметричным разводом от 5 до 10 кДж (рисунок 6 б). При верхнем разводе шероховатость $R_{m, max}$ среза ветви минимальна и составляет около 200 мкм (рисунок 6, в). В то же время при симметричном разводе шероховатость принимает большие значения (от 260 мкм) и возрастает с увеличением угла развода до 500 мкм.

В процессе обрезки кроны дерева часто приходится удалять ветви, расположенные не перпендикулярно к плоскости пилы. Угол встречи θ между плоскостью пильного диска и стволом ветви может составлять от 60° до 120° . Установлено, что F_{\max} имеет параболическую зависимость от угла θ (рисунок 7, а). Работа A увеличивается с увеличением площади среза, поэтому имеет зависимость, близкую к закону $A=A_0/\cos \theta$ (рисунок 7, б).

Проведена серия экспериментов, при которой угол резания δ изменялся от 60° до 120° с шагом 10° .

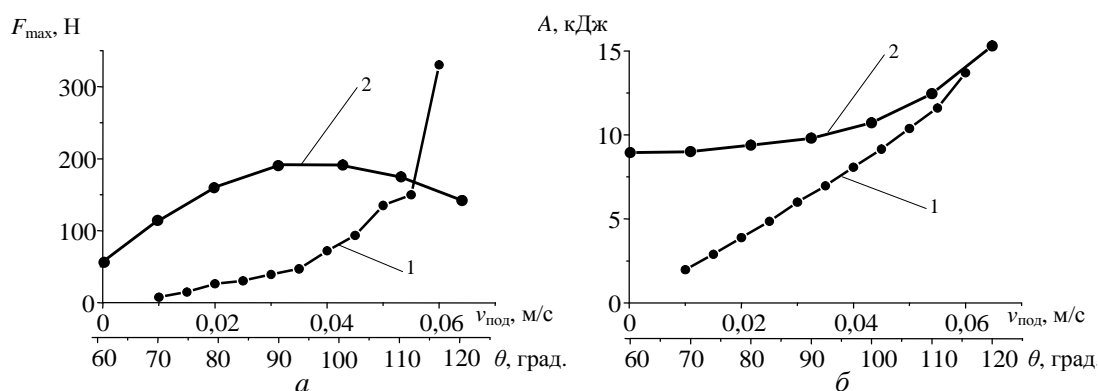


Рисунок 7 – Зависимости максимальной силы резания на зубе F_{\max} (а) от скорости $v_{\text{под}}$ подачи пильного диска (1) и угла встречи $\Delta\theta$ (2) и работы A срезания ветви (б) от скорости $v_{\text{под}}$ подачи пильного диска (1) и угла встречи θ (2)

Установлено, что F_{\max} практически не зависит от угла δ (рисунок 8, а), в то время как работа срезания ветви A уменьшается с увеличением δ (рисунок 8, б). В интервале от 120 до 160° работа резания практически не изменяется и лежит в пределах $7,5...8,0$ кДж. Поэтому предлагается угол резания для длинной боковой режущей кромки принимать в пределах $140...160^\circ$. Максимальная сила резания F_{\max} незначительно изменяется от угла заточки β зуба (рисунок 8, а). В то же время работа резания ветви увеличивается с $7,5$ кДж до $9,5$ кДж при увеличении угла заточки β от $40^\circ...80^\circ$ (рисунок 8, б). Поэтому угол заточки зуба принимается равным $30^\circ...40^\circ$ с минимальными энергозатратами.

Порода деревьев оказывает существенное влияние на возникающие на зубьях пилы силы и энергетические затраты по обрезке ветви. Проведена серия экспериментов, при которых менялась твердость древесины от 4,6 до 50,6 Н/мм² с шагом 4,6 Н/мм².

Максимальная сила резания меняется от 57,7 Н для легкообрабатываемой древесины (сосна) до 173,7 Н для труднообрабатываемой древесины (береза). Работа резания ветви изменяется от 6,28 до 14,77 кДж соответственно.

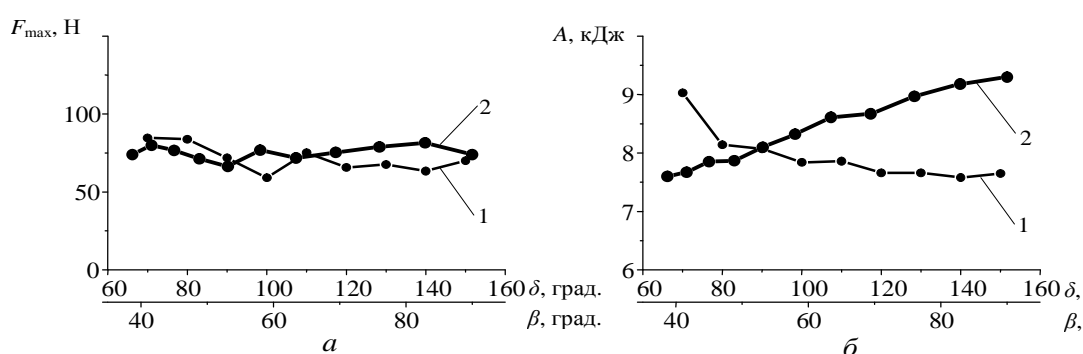


Рисунок 8 – Зависимости максимальной силы резания F_{max} (а) от угла резания δ (1) и угла заточки β (2) и работы A срезания ветви (б) от угла резания δ (1) и угла заточки β (2)

На величину скорости подачи пилы, которая определяет качество среза оказывают влияние следующие величины: подача на зуб – U_z , число зубьев – Z , диаметр пилы – D и окружная скорость вращения пилы – V_p . Целевая функция при ограничениях варьируемых факторов имеет вид:

$$\begin{cases} V_r(U_z, V_\delta, Z, D) \rightarrow \min, \\ 0.001 \leq U_z \leq 0.006; 20 \leq V_\delta \leq 40; 90 \leq Z \leq 120; 0.4 \leq D \leq 0.65. \end{cases} \quad (3)$$

В результате проведенной оптимизации выявлено, что оптимальными параметрами резания дисковой пилой являются окружная скорость 30 м/с, подача на зуб 0,012 мм, диаметр пилы 0,5 м, количество зубьев на дисковой пиле 100 шт.

Таким образом, при решении математической модели процесса резания с использованием метода конечных элементов, при решении

которой установлено, что при одностороннем разводе зубьев пилы шероховатость среза ветвей составляет около 200 мкм, в то же время при симметричном разводе шероховатость среза находится в пределах 260...500 мкм. Энергоемкость процесса резания при одностороннем разводе зубьев пилы по сравнению с симметричным снижается в 1,4...1,5 раза. Рекомендуются следующие параметры дисковой конической пилы: диаметр пилы 0,5 м, количество зубьев на дисковой пиле 100 шт, подача на зуб 0,012...0,024 мм, скорость резания 26...30 м/с, развод зубьев 0,2...0,4 мм, угол резания для длинной боковой режущей кромки 160°, угол заточки зуба 30°...40°, для короткой боковой режущей кромки угол резания 50°.

Литература

1. Попиков, В. П. Механизация обрезки крон деревьев и кустарников [Текст] / Д. Д. Репринцев, М. В. Драпалюк, В. П. Попиков. // Лесн. хоз-во. – 2006. – № 1. – С. 45.
2. Попиков, В. П. Имитационное моделирование технологического процесса лесной машины с гидроприводом дискового рабочего органа [Текст] / В. П. Попиков, В. Н. Коротких, М. В. Драпалюк // Вестн. КрасГАУ. – 2009. – № 5 – С. 129-132.
3. Попиков, В. П. Моделирование процесса обрезки ветвей деревьев дисковой пилой на лесосеменных плантациях [Текст] / В. П. Попиков, Л. Д. Бухтояров // Вестн. КрасГАУ. – 2009. – № 8 – С. 3-7.
4. Свид-во 30057 РФ, МПК⁷ А 01 G 3/04. Рабочий орган машины для подрезки крон деревьев [Текст] / В. П. Попиков, Д. Д. Репринцев, П. И. Попиков ; заявитель и патентообладатель ВГЛТА. – № 2002129704/20 ; заявл. 05.11.02 ; опубл. 20.06.03, Бюл. № 17. – 2 с.
5. Пат. 2374824 РФ, МПК⁷ А01G 3/00. Рабочий орган машины для подрезки крон деревьев [Текст] / В. П. Попиков, Л. Д. Бухтояров, М. Д. Драпалюк ; заявитель и патентообладатель ВГЛТА. – № 2008106730/12 ; заявл. 21.02.2008 ; опубл. 10.12.09, Бюл. № 34. – 7 с.