

УДК 630.363.7

Определение силы затягивания материала ножом рубительной машины

Баранов Николай Федотович, доктор техн. наук, профессор,

Фуфачев Вадим Сергеевич, кандидат техн. наук, доцент,

Ступин Игорь Валерьевич, соискатель

ФГБОУ ВО ВГСХА, г. Киров, Россия

E-mail: fuf.vs@mail.ru

В сельском хозяйстве находят применение рубительные машины, предназначенные для измельчения древесины при утилизации отходов лесопиления, получения топливной щепы, но они могут использоваться и при освоении выведенных из севооборота земель, заросших мелколесьем и кустарниками. В Вятской ГСХА ведется совершенствование и оптимизация параметров рубительной машины РБ-750 с комбинированным рабочим органом, эффективность которой зависит от ряда конструктивных факторов: угол затягивания, угол защемления, расположение противорежущей пластины и ряд других. Угол встречи в процессе резания изменяет свое значение и влияет на силу затягивания материала ножом. Максимальное значение силы затягивания возможно при наименьшем угле встречи, но это ухудшает качество готового продукта. Для обоснования конструктивных параметров рабочих органов проведены теоретические исследования с рассмотрением двух основных случаев: когда угол встречи меньше и больше 90° . Полученные зависимости позволяют определить значения параметров режущей пары, обеспечивающих затягивание материала при изменяющихся условиях резания: соотношении составляющих силы резания, коэффициента трения материала по поверхности рабочих органов. Экспериментальные исследования, направленные на подтверждение теоретических предпосылок, проводили на лабораторной установке, позволяющей регистрировать силу затягивания образца материала ножами барабанного измельчающего рабочего органа. Реализованные опыты позволили получить модель регрессии, характеризующую влияние исследуемых факторов на силу затягивания материала ножами. Результаты опытов подтверждают выдвинутые теоретические предположения и позволяют сделать выводы об оптимальных значениях факторов: угол затягивания $\gamma = 4,5...4,8^\circ$; расположение противорежущей пластины ниже горизонтальной оси барабана на $20...21$ мм; угол защемления материала $\chi = 30^\circ$.

Ключевые слова: рубительная машина, экспериментальная установка, процесс резания, сила резания, сила затягивания, угол встречи, угол защемления, оптимальные значения

Предприятием ООО «Котельничский механический завод» Кировской области освоен выпуск малоножевых дисковых рубительных машин двух типоразмеров: РБ-750 и РБ-1500. Сельскохозяйственные предприятия используют данные машины для измельчения преимущественно отходов лесопиления с целью получения топливной щепы, но они могут применяться и при освоении выведенных из севооборота земель, заросших мелколесьем и кустарниками.

Опыт эксплуатации рубительных машин наряду с положительными характеристиками выявил и ряд их недостатков, одним из которых является затрудненная подача материала к ножам через наклонную загрузочную горловину. При измельчении длинномерной древесины требуются значительные трудозатраты, что снижает производительность и ухудшает условия труда. Вятской ГСХА совместно с ООО «Доза-Гран» ведутся исследования по совершенствованию рабочего процесса рубительной машины.

Цель исследований – обоснование параметров рабочих органов рубительной машины РБ-750, позволяющих осуществлять процесс измельчения с самозатягиванием мате-

риала. Предложен вариант измельчающего устройства с барабанным рабочим органом.

Схема резания древесины рубительной машиной с радиусом резания $R_{рез}$, высотой оси барабана над противорежущей плоскостью B , при подаче материала в горизонтальной плоскости толщиной слоя материала h представлена на рисунке 1.

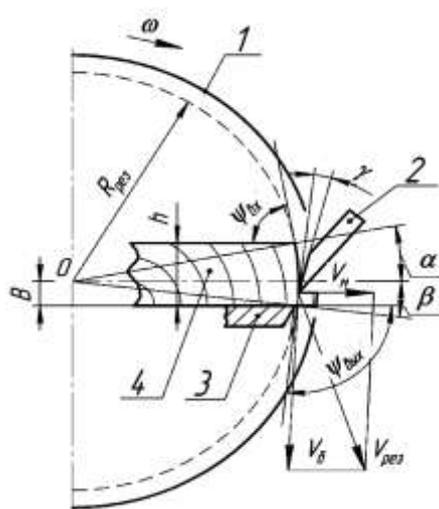


Рис. 1. Схема взаимодействия ножа с материалом: 1 – барабан; 2 – нож; 3 – противорежущая пластина (противорез); 4 – материал

Угол между вектором линейной скорости ножа на входе в материал и направлением подачи, называемый углом встречи ψ , определяется из соотношения:

$$\psi_{\text{вх}} = 90^\circ - \alpha = 90^\circ - \arcsin \frac{h-B}{R_{\text{рез}}} \quad (1)$$

Угол взаимодействия лезвия ножа с материалом (по направлению волокон) на выходе составляет:

$$\psi_{\text{вых}} = 90^\circ + \beta = 90^\circ + \arcsin \frac{B}{R_{\text{рез}}}$$

Так как угол встречи в процессе резания слоя материала является не постоянным, то происходит значительное изменение составляющих силы взаимодействия ножа с древесиной, в том числе и силы затягивания материала ножом.

Угол, образованный задней гранью ножа и поверхностью резания, называют задним углом или углом затягивания [1].

Величину угла затягивания γ выбирают из условия:

$$\gamma \geq \arctg \varepsilon = \frac{V_{\text{м}}}{V_{\text{рез}}},$$

где $V_{\text{м}}$ – скорость движения материала в зону измельчения; $V_{\text{рез}}$ – скорость резания.

Скорость движения материала определяется силовым воздействием ножа в процессе перерезания слоя материала и углом наклона горловины и изменяется в достаточно широких пределах. Для большинства дисковых и барабанных режущих аппаратов эти значения составляют 0,83...4,6 м/с [1, 2].

Скорость резания $V_{\text{рез}}$ рассчитывается из линейной скорости ножа, которую можно считать постоянной в процессе резания, равной $\omega \cdot R_{\text{рез}}$, и скорости подачи материала $V_{\text{м}}$ по формуле:

$$V_{\text{рез}}^2 = V_{\text{м}}^2 + (\omega \cdot R_{\text{рез}})^2 + 2V_{\text{м}} \cdot \omega \cdot R_{\text{рез}} \cdot \cos \psi, \quad (2)$$

где ω – угловая скорость режущего барабана.

Направление скорости резания $V_{\text{рез}}$ влияет на условия затягивания материала к ножовому барабану.

Если резание осуществляется выше оси барабана, то движение ножа способствует затягиванию материала. При резании в зоне, расположенной ниже оси барабана, нож стремится оттолкнуть материал. Поэтому необходимо создать такие условия, чтобы на всем пути резания действовала сила затягивания. Для этого противорез должен быть установлен выше точки, в которой сила, действующая в направлении подачи, меняет знак на обратный.

Схема внешних сил, действующих на материал от передней грани ножа, показана на рисунке 2. Силой тяжести и силовым воздействием задней грани ножа ввиду их малости можно пренебречь. Суммарная сила S в точке резания A определяется составляющими: нормальной $P_{\text{н}}$, направленной по радиусу окружности резания, и тангенциальной $P_{\text{к}}$ – касательно к окружности.

Для определения силы воздействия ножа в направлении подачи материала суммарную силу S представим парой сил, одна из которых $P_{\text{и}}$ действует в направлении подачи, то есть вдоль волокон древесины и является силой затягивания, вторая $P_{\text{ин}}$ – перпендикулярная к ней.

В начальный момент резания, когда лезвие ножа расположено выше горизонтальной оси барабана, угол встречи $\psi < 90^\circ$. В проекциях на ось x сил, действующих на материал (рис. 2), получим уравнение для определения силы затягивания:

$$P_{\text{и}} = P_{\text{к}} \cdot \cos \psi - F_{\text{тр}} + P_{\text{н}} \cdot \cos \theta, \quad (3)$$

где θ – угол между направлением волокон древесины и нормальной составляющей $P_{\text{н}}$ силы резания.

Выразим $P_{\text{к}}$ и $P_{\text{н}}$ через силу S и угол ε :

$$P_{\text{и}} = S \cdot \cos \varepsilon \cdot \cos \psi - F_{\text{тр}} + S \cdot \sin \varepsilon \cdot \cos \theta,$$

где ε – угол между направлениями силы резания S и тангенциальной составляющей $P_{\text{к}}$.

Так как $\psi = 90^\circ - \theta$,

а $F_{\text{тр}} = S \cdot f_{\text{тр}} \cdot \cos(\varepsilon + \theta)$, то уравнение (3) запишется:

$$P_{\text{и}} = S \cdot (\cos \varepsilon \cdot \sin \theta + \sin \varepsilon \cdot \cos \theta) - S \cdot f_{\text{тр}} \cdot \cos(\varepsilon + \theta).$$

Проведя тригонометрические преобразования, получим:

$$P_{\text{и}} = S [\sin(\varepsilon + \theta) - f_{\text{тр}} \cdot \cos(\varepsilon + \theta)]. \quad (4)$$

При $\psi > 90^\circ$ (рис. 2) получим уравнение действия сил, аналогичное выражению (3):

$$P_{\text{и}} = -P_{\text{к}} \cdot \cos(180^\circ - \psi) - F_{\text{тр}} + P_{\text{н}} \cdot \cos \theta. \quad (5)$$

В результате преобразований уравнение (5) запишется:

$$P_{\text{и}} = S \cdot \sin(\varepsilon - \theta) - P_{\text{ин}} \cdot f_{\text{мп}}. \quad (6)$$

Так как $P_{\text{ин}} = S \cdot \cos(\varepsilon - \theta)$, то уравнение (6) принимает вид:

$$P_{\text{и}} = S [\sin(\varepsilon - \theta) - f_{\text{тр}} \cdot \cos(\varepsilon - \theta)]. \quad (7)$$

Получено уравнение для определения силы затягивания, аналогичное выражению (4), но со сменой знака угловых параметров.

Для определения расстояния B_0 от противореза до оси барабана (точка "А" на дуге резания материала, в которой прекращается затягивание) следует решить уравнение (7), приравняв его к нулю.

$$P_{и} = 0 \text{ при } \sin(\varepsilon - \theta) - f_{тр} \cdot \cos(\varepsilon - \theta) = 0.$$

Отсюда $\sin(\varepsilon - \theta) = f_{тр} \cdot \cos(\varepsilon - \theta)$ или

$$f_{тр} = \frac{\sin(\varepsilon - \theta)}{\cos(\varepsilon - \theta)} = \operatorname{tg}(\varepsilon - \theta).$$

Тогда $(\varepsilon - \theta) = \arctg f_{тр}$.

Так как значение коэффициента трения древесины по стали может быть принято из известных источников [1, 2] и в зависимости от влажности составляет приблизительно 0,2...0,5, то $(\varepsilon - \theta) \cong 12...27^\circ$.

Значение угла ε определяется из соотношения $\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{P_{и}}{P_{к}}$ и зависит от ряда конструк-

тивных факторов, таких как угол заточки лезвия, угол затягивания, угол резания, угол

встречи, остроты лезвия и состояния древесины. Поэтому данную величину можно получить экспериментально, либо принять по литературным источникам [3, 4].

Исходя из известных значений удельной силы резания $P_{рез.уд.}$ [4, 5], можно вычислить значения составляющей $P_{иi}$ для различных положений ножа относительно горизонтальной оси барабана при выбранном сечении заготовки и представить результаты в виде эпюры.

В таблице 1 приведены расчетные значения силы затягивания $P_{и}$ в долях суммарной силы резания S при различных положениях ножа, определяемых значениями угла θ . Начало отсчета принято при $\psi < 90^\circ$ и значении $\theta = -50^\circ$ относительно оси χ . На рисунке 2 представлена эпюра сил $P_{и}$.

Характер изменения силы затягивания $P_{и}$ показывает, что наиболее предпочтительным является зона подачи материала выше оси вращения барабана. Это позволяет организовать подвод сырья к ножам рубительной машины без подающего механизма.

Таблица 1

Зависимость силы затягивания $P_{и}$ в долях силы резания S от угловых характеристик ψ и θ

Показатель	Положение ножа относительно горизонтальной оси барабана									
	Угол встречи $\psi < 90^\circ$									
Угол $\theta,^\circ$	-50	-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5
$P_{и}$	0,884	0,827	0,765	0,695	0,621	0,542	0,458	0,372	0,282	0,191
	Угол встречи $\psi > 90^\circ$									
Угол $\theta,^\circ$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$P_{и}$	0,098	0,042	-0,090	-0,183	-0,275	-0,365	-0,448	-0,535	-0,610	-0,684

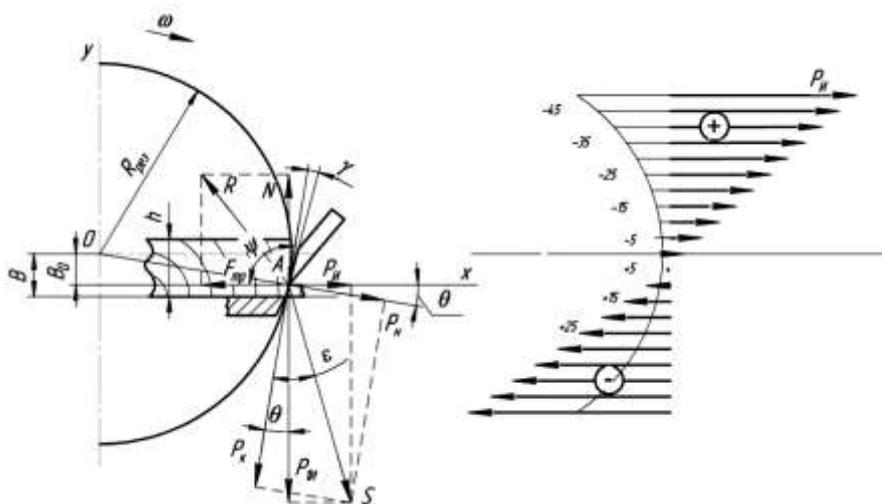


Рис. 2. Схема сил взаимодействия ножа с материалом и эпюра силы затягивания $P_{и}$

Для выявления степени влияния на B_0 факторов $tg\varepsilon$ и $f_{тр}$ по данным таблицы 2 рассчитана модель регрессии при значениях переменных:

$$tg\varepsilon = 0,5 \dots 0,7; f_{тр} = 0,3 \dots 0,5.$$

Радиус резания принят равным 350 мм.

$$B_0 = 56,17 + 24,84 \cdot tg\varepsilon - 31,61 \cdot f_{тр} - 0,86 \cdot tg\varepsilon \cdot f_{тр}. \quad (8)$$

Из полученных результатов следует, что с увеличением отношения P_H/P_K проти-

ворезующую пластину можно размещать ниже горизонтальной оси вращения режущего аппарата на большую величину B_0 . При увеличении коэффициента трения материала о противорез, во многом зависящего от влажности, значение B_0 следует уменьшить, иначе будет отсутствовать затягивание материала ножом. Поэтому при определении оптимального значения B_0 необходимо решить компромиссную задачу.

Таблица 2

Расчетные значения положения противореза B_0 относительно оси барабана («+» ниже оси, «-» выше оси) в зависимости от P_H/P_K и коэффициента трения $f_{тр}$

Показатель								
$tg\varepsilon = P_H/P_K$	$f_{тр}$	B_0	$f_{тр}$	B_0	$f_{тр}$	B_0	$f_{тр}$	B_0
0,4	0,2	63,7	0,3	31,5	0,4	0	0,5	-28,4
0,5		94,5		63,7		31,5		3,1
0,6		117,9		92,4		52,4		27,3
0,7		151,6		115,8		71,8		51,8

Для подтверждения теоретических предпосылок проведены экспериментальные исследования влияния на усилие затягивания материала ножами барабанного режущего аппарата таких геометрических факторов, как угол затягивания γ между задней гранью ножа и направлением резания (рис. 1), расположение противореза относительно оси барабана по высоте (фактор B) и угол защемления материала χ

Реализована матрица плана Бокса-Бенкена (табл. 3). Угол затягивания изменялся в пределах $3 \dots 9^\circ$ уменьшением угла заточки ножа. Положение B противореза по высоте относительно оси барабана выбирали исходя из теоретических обоснований и эпюры силы затягивания. Данный фактор изменяли от 0 до 40 мм ниже оси барабана. Угол защемления χ материала ножом и противорезующей пластины изменялся от 0 до 30° перестановкой противореза.

Опыты проводили на экспериментальной установке, общий вид которой показан на рисунке 3, позволяющей определить силу затягивания.

Измельчаемым материалом являлись сосновые бруски с относительной влажностью $15 \dots 17\%$. Измерение силы P_H во времени осуществлялось с помощью тензорезисторного датчика T24A-0,005-C3, который жестко соединялся с измельчаемым бруском. В каче-

стве регистрирующей аппаратуры использовался цифровой многоканальный самописец «S-Recorder-L» и персональный компьютер.



Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки

Эквивалентную силу резания определяли по диаграммам записи процесса по формуле [6, с. 273]. В результате обработки экспериментальных данных получена адекватная математическая модель, характеризующая влияние исследуемых факторов на критерии оптимизации.

$$P_{зат} = 36,94 - 2,03x_1 + 6,54x_3 - 2,52x_1^2 - 7,55x_2^2 - 3,02x_1x_2. \quad (9)$$

Таблица 3

Матрица плана Бокса-Бенкена и результаты эксперимента

Обозначения	Факторы			Критерий оптимизации
	$\gamma, ^\circ$	$B, \text{мм}$	$\chi, ^\circ$	
	x_1	x_2	x_3	\bar{y}
Верхний уровень(+1)	3	0	0	$\bar{D}_E, \text{Н}$
Средний уровень (0)	6	20	15	
Нижний уровень (-1)	9	40	30	
1	-1	-1	0	34,04
2	1	-1	0	22,88
3	-1	1	0	24,80
4	1	1	0	25,72
5	-1	0	-1	30,17
6	1	0	-1	27,68
7	-1	0	1	38,62
8	1	0	1	35,13
9	0	-1	-1	18,49
10	0	1	-1	19,05
11	0	-1	1	35,32
12	0	1	1	38,62
13	0	0	0	36,93
14	0	0	0	37,84
15	0	0	0	36,04

Анализ уравнения регрессии показывает, что максимальная сила затягивания достигается при значении $\gamma = 4,5...4,8^\circ$, положении противорежущей пластины ниже оси барабана на 20 мм и максимальном (в области эксперимента) угле защемления материала χ , равном 30° . При этом угол защемления наиболее существенно влияет на силу затягивания.

Уменьшение силы затягивания материала ножом при увеличении $\gamma > 5^\circ$ объясняется уменьшением угла заточки ножа. При этом силовое воздействие передней грани ножа на материал не изменяется, так как ее геометрические параметры остаются неизменными. Поэтому изменяется соотношение силы P_n и P_k (рис. 2), следовательно, изменяются и силы P_n и P_{1n} .

При значении угла $\gamma > 4,5^\circ$ уменьшение силы затягивания можно объяснить возрастанием силы трения при смятии древесины задней гранью ножа.

Выводы. 1. В результате проведенных теоретических исследований выявлены основные факторы, влияющие на формирование силы затягивания ножом режущего аппарата барабанного типа.

2. Получена зависимость, позволяющая определить местоположение противорежущей пластины в зависимости от изменения соотношения составляющих силы резания и коэффициента трения древесины.

3. По экспериментальным данным построена модель регрессии, на основании которой получены оптимальные значения факторов, влияющих на силу затягивания материала ножом: угол затягивания $\gamma = 4,5...4,8^\circ$; расстояние от противорежа до горизонтальной оси барабана $B = 20...21$ мм; угол защемления материала $\chi = 30^\circ$.

Список литературы

1. Вальщиков Н.М. Рубительные машины. Л.: Машиностроение, 1970. 328 с.
2. Трение. Коэффициенты трения. Триботехника - наука о трении. <http://www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/Frication> (дата обращения 27.11.2015).
3. Коперин Ф.И. Производство технологической щепы в леспромхозах. М.: Лесная промышленность, 1971. 272 с.
4. Резник Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов. М.: «Машиностроение», 1975. 311 с.

5. Баранов Н.Ф., Фуфачев В.С., Ступин И.В. Влияние угла скольжения на удельную работу резания древесины // Пермский аграрный вестник. 2015. №2. С. 30-35.

6. Чиликин М.Г., Соколов М.М. и др. Основы автоматизированного электропривода. М.: Энергия, 1974. 567 с.

Determination of material's tightening force with chipper knife

Baranov N.F., DSc in technics, professor,
Fufachev V.S., PhD in technics, associate professor,
Stupin I.V., applicant
Vyatka State Agricultural Academy, Kirov, Russia

Chippers designed for chopping wood at the sawmill waste, produce of wood chips could be used in agriculture; they used at development of lands derived from the rotation overgrown with undergrowth and bushes. The improvement and optimization of parameters of chipper RB-750 with a combined working body, the effectiveness of which depends on a number of structural factors: the angle tightening angle pinch location shearbar and others is conducted in Vyatka State Agricultural Academy. Angle of incidence in the cutting process changes its value and affects the strength of the material tightening with knife. The maximum value of a tightening force is possible at the smallest impact angle, but it degrades the quality of the finished product. To justify the design parameters of the working body theoretical research were conducted with the consideration of two major cases: when the angle of incidence is less and more than 90° . The obtained dependences allow to determine the parameters of the cutting pair providing material delay at changing cutting conditions: the ratio of the components of the cutting force; the coefficient of friction of material on the surface of working bodies. Experimental studies on confirming of the theoretical assumptions were made in a laboratory machine which allows to register the effect of a tightening of sample material with knives of grinding drum of the working body. Completed experiments yielded a regression model that characterizes the effect of investigated factors on the strength of a material tightening with knives. The experimental results confirm the theoretical assumptions put forward and allow to draw conclusions about the optimal values of the factors: angle of delaying $\gamma = 4.5...4.8^\circ$; location of shearbar below the horizontal axis of the drum on 20...21 mm; angle of crushing material $\chi = 30^\circ$.

Key words: *chipper, experimental machine, cutting process, cutting force, tightening strength, impact angle, pinching angle, optimal values*

References

1. Val'shchikov N.M. *Rubitel'nye mashiny*. [Chippers]. Leningrad: Mashinostroenie, 1970. 328 p.

2. *Trenie. Koeffitsienty treniya. Tribotekhnika - nauka o trenii*. [Friction. Friction factors. Tribotechnics – science about friction]. Available at: <http://www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/Frication> (accessed 27.11.2015).

3. Koperin F.I. *Proizvodstvo tekhnologicheskoy shchepy v lespromkhozakh*. [Manufacture of wood chips in logging companies]. Moscow: Forest Industry, 1971, 272 p.

4. Reznik N.E. *Teoriya rezaniya lezviem i osnovy rascheta rezhushchikh apparatov*. [The theory of the cutting with blade and the basis of calculation of cutting devices]. Moscow: «Machinostroenie», 1975. 311 p.

5. Baranov N.F., Fufachev V.S., Stupin I.V. Influence of slip angle on the specific work of wood's cutting Perm. *Permskiy agrarnyy vestnik*. 2015. no.2. pp.30-35.

6. Chilikin M.G., Sokolov M.M. i dr. *Osnovy avtomatizirovannogo elektroprivoda*. [Basics of automated electric drive]. Moscow: Energiya, 1974. 567 p.