

## Силовой расчет ножей с криволинейными режущими кромками для резания древесины

В.Е. Родионов<sup>а</sup>, В.М. Дербин<sup>б</sup>, М.В. Дербин<sup>с</sup>, В.Н. Удальцов<sup>д</sup>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины 17, Архангельск, Россия

<sup>а</sup>v.rodionov@narfu.ru, <sup>б</sup>v.derbin@narfu.ru, <sup>с</sup>m.derbin@narfu.ru, <sup>д</sup>v.udaljcov@narfu.ru

Статья поступила 10.05.2017, принята 18.05.2017

*В статье рассмотрен вопрос о расчете усилия бесстружечного резания древесины ножами с криволинейными режущими кромками поперек волокон. Современные пакетиروувки отходов лесозаготовок оснащены ножами с полукруглыми режущими кромками, предназначенными для деления отходов, упакованных в цилиндрические пакеты. Деление пакетов производят гильотинной установкой с двумя ножами, движущимися навстречу друг другу под действием гидропривода. Использование ножей для деления пакетов имеет ряд преимуществ по сравнению с цепными пилами. Время на перерезание упакованных отходов лесозаготовок ножами в среднем на 25–34 % меньше, чем при раскряжевке цепной пилой. В данной статье произведен расчет усилия резания ножами с полукруглой (диаметр 0,8 м) и параболической режущими кромками. Форма параболического ножа описывается функцией  $y = 2,5x^2$ . Расчет выполнен с использованием теории резания древесины проф. С.А. Воскресенского. При расчете было также учтено влияние угла  $\lambda$  наклона режущей кромки к вектору скорости резания  $\lambda$ . Усилие резания древесины в общем виде выглядит как  $P = P_k \sin \lambda + P_3 + P_6$ , где  $P_k$  – усилие внедрения клинообразной части ножа в древесину;  $P_3$  – усилие на преодоление сопротивления трения задней грани ножа о древесину;  $P_6$  – усилие на преодоление сопротивления трения верхней грани ножа о древесину. Для определения переменных значений использовался графоаналитический метод. Расчеты показали, что снижение максимального усилия резания составило 4,2 % для параболической режущей кромки по сравнению с полукруглой. Сделаны выводы о целесообразности применения ножей с параболической режущей кромкой на современных пакетируувках отходов лесозаготовок.*

**Ключевые слова:** пакетируувик; гильотина; сбор отходов лесозаготовок; древесная биомасса; режущее устройство; бесстружечное резание древесины; режущая кромка.

## Power calculation of knives with curvilinear cutting edges for cutting wood

V.E. Rodionov<sup>а</sup>, V.M. Derbin<sup>б</sup>, M.V. Derbin<sup>с</sup>, V.N. Udaltsov<sup>д</sup>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov; 17, Severnaya Dvina Emb., Arkhangelsk, Russia

<sup>а</sup>v.rodionov@narfu.ru, <sup>б</sup>v.derbin@narfu.ru, <sup>с</sup>m.derbin@narfu.ru, <sup>д</sup>v.udaljcov@narfu.ru

Received 10.05.2017, accepted 18.05.2017

*The paper discusses the problem of calculating the wood cutting effort while using curved edges knives across the fibers. Modern logging waste bundlers are equipped with knives with semicircular cutting edges intended for dividing waste into cylindrical packs. The division of the packs is carried out with a guillotine installation with two moving knives moving towards each other under the action of a hydraulic drive. The use of knives for packages dividing has several advantages over the use of chain saws. The average time of dividing by knives is 25-34% less than cutting with a chain saw. It is also possible to use other forms of cutting edge instead of semicircular one - a parabolic shape, for example. The cutting force of knives with a semicircular (diameter 0.8 m) and parabolic cutting edges is calculated. The shape of a parabolic knife is described with the function  $y = 2,5x^2$ . The calculation is made according to the scheme of S.A. Voskresensky, based on a mechanical and mathematical analysis of the cutting process. When calculating, the effect of the angle of inclination of the cutting edge on the cutting speed vector  $\lambda$  was also taken into account. The general formula for calculating the cutting force is the expression  $P = P_k \sin \lambda + P_3 + P_6$ , where  $P_k$  - is the insertion force of the wedge-shaped part of the knife,  $P_3$  - the friction resistance overcome the back edge of the knife against the wood,  $P_6$  - the effort to overcome the frictional resistance of the upper edge of the knife. The graphic-analytical method was used to determine the variable values. Calculations showed that the maximum cutting force reduction is 4.2% for the parabolic cutting edge. Conclusions are drawn about the use of knives with a parabolic cutting edge on modern logging waste bundlers.*

**Keywords:** bundler; guillotine; shear; logging waste collection; wood biomass; cutting device; chipless wood cutting; cutting edge.

**Введение**  
Повышение цен на ископаемые источники энергии и развитие биоэнергетики в Российской Федерации и за

рубежом вызывают спрос на древесное топливо [13–17; 19; 20].

Так, министр энергетики РФ Александр Новак заявил, что объем возобновляемых источников энергии с учетом гидроэлектростанций в РФ к 2024 г. достигнет порядка 20 %. По его словам, это поможет решить проблему снабжения энергией технологически изолированных территорий России.

Одним из источников древесного топлива являются отходы лесозаготовок [14].

Для сбора и упаковывания отходов лесозаготовок в европейских странах используют машины-пакетировщики. Проводятся исследования эффективности их работы [4; 5; 10; 11].

Пакетировщики состоят из самоходной машины, имеющей манипулятор для подбора остатков и пакетировочное устройство, размещенное на шасси [8].

Существует целый ряд пакетировщиков, различных по конструкции и способу производства пакета (тюка) [8].

Некоторые пакетировщики после формирования пакета (сжатия и обвязки) выполняют его деление на необходимую длину. Существует два способа деления пакетов с отходами лесозаготовок:

1. Деление цепными пилами (John Deere 1490D) [18; 19].
2. Деление бесстружечным резанием установками гильотинного типа (Monra Forestal ENFO 2000) [3; 4].



Рис. 1. Общий вид пакетировщиков древесных отходов: а — Monra Forestal ENFO 2000; б — John Deere 1490D

Цепные пилы хорошо зарекомендовали себя при пилении стволовой древесины, обладая высокой скоростью прохода сквозь однородные слои. Однако исследования показали, что раскряжевка ножницами гильотинного типа является более эффективным и надежным способом, чем раскряжевка пилой. Так, у пакетировщика ENFO 2000 повторная резка требовалась для одного из 50 пакетов, а у John Deere 1490D — для каждого второго пакета (тюка) [4].

Пакетировщик Monra Forestal ENFO 2000 производит деление пакетов механизмом гильотинного типа с полукруглыми ножами под действием гидропривода [3; 8].

Использование ножей для раскряжевки упакованных отходов лесозаготовок имеет следующие преимущества в сравнении с цепной пилой:

1. Меньшая удельная работа резания, меньшие энергозатраты на резание.
2. Меньшие затраты на техническое обслуживание режущего органа [4].
3. Более высокая устойчивость к износу.
4. Простота изготовления.
5. Меньшее время деления (в среднем на 25–34 %) [4].

Для деления упакованных отходов лесозаготовок бесстружечный способ резания является наиболее подходящим. Такой способ, как сказано выше, используется в раскряжевочном устройстве пакетировщика Monra Forestal ENFO 2000, в котором устанавливаются полукруглые ножи, однако полукруг является далеко не лучшей формой режущей кромки. Возможным способом повышения эффективности деления упакованных отходов может стать использование ножей с параболической режущей кромкой.

*Цель исследования* — проанализировать усилия резания ножей с параболической и полукруглой режущими кромками.

*Материалы и методы.* Расчет усилия резания плоскими ножами с параболической и полукруглой режущими кромками при перерезании круглого березового ствола диаметром 0,8 м с одинаковыми параметрами:  $a = 0,8$  м,  $b = 0,8$  м (рис. 2). Толщина ножа 5 мм.

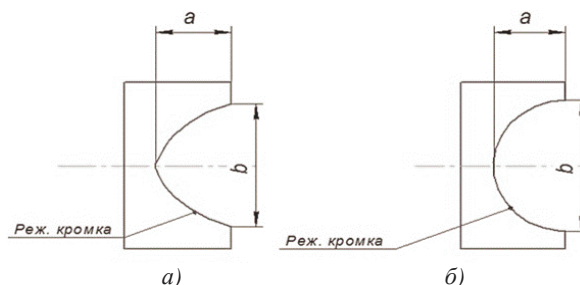


Рис. 2. Формы режущих кромок исследуемых ножей и их параметры: а — параболическая; б — полукруглая

Кривая параболической режущей кромки с параметрами  $a = 0,8$  м и  $b = 0,8$  м описывается формулой  $y = 2,5x^2$ .

Для расчета усилия резания воспользуемся схемой, предложенной проф. С.А. Воскресенским, которая основана на механико-математическом анализе процесса резания [9], где усилие резания складывается из составляющих. Из источников [2; 6; 7] известно, что общее усилие резания для плоских ножей определяется по выражению:

$$P = P_n + P_d + P_3 + P_b, \quad (1)$$

где  $P_n$  — усилие надрезания волокон древесины;  $P_d$  — усилие деформирования древесины передней гранью ножа;  $P_3$  — усилие на преодоление сопротивления трения задней грани ножа о древесину;  $P_b$  — усилие на преодоление сопротивления трения верхней грани ножа.

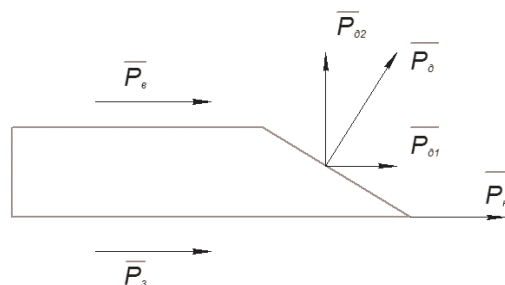


Рис. 3. Схема составляющих сил усилия резания при перерезании плоскими ножами

Усилие надрезания волокон древесины плоскими ножами с прямолинейно режущей кромкой определяется [2, с. 34]:

$$P_H = 2q_{дл}\rho\sqrt{x(d_c-x)}(2 + \mu_{дл}(1 + \cos\delta)), \quad (2)$$

где  $q_{дл}$  — нормальное удельное давление на лезвие ножа, при котором происходит разрушение волокон;  $x$  — глубина внедрения ножа, м;  $\rho$  — радиус закругления лезвия ножа, м; коэффициент трения лезвия ножа о древесину;  $\delta$  — угол резания ножа, равный углу его заточки;  $d_c$  — диаметр образца в месте перерезания, м.

Усилие деформирования древесины передней гранью для плоских ножей с прямолинейной режущей кромкой [2, с. 34] определяется по формуле:

$$P_d = 2 \cdot \sigma_{в.см.} t_n (1 + \mu_d \text{ctg}\delta \sqrt{x(d_c-x)}), \quad (3)$$

где  $\sigma_{в.см.}$  — временное сопротивление смятию древесины передней гранью ножа,  $\text{кН/м}^2$ ;  $t_n$  — толщина ножа, м;  $\mu_d$  — коэффициент трения передней грани ножа с древесиной,  $\mu_d = \mu_{дл}$ .

Усилие на преодоление сопротивления по задней грани ножа для плоских ножей:

$$P_3 = K_y \rho F_3 \mu_3, \quad (4)$$

где  $K_y$  — коэффициент упругого восстановления волокон древесины,  $\text{Н/м}^3$ ;  $F_3$  — площадь контакта задней грани ножа с древесиной,  $\text{м}^2$ ;  $\mu_3$  — коэффициент трения задней грани ножа о древесину.

Усилие на преодоления трения по верхней грани ножа для плоских ножей:

$$P_b = K_y t_n F_b \mu_b, \quad (5)$$

где  $t_n$  — толщина ножа, м;  $F_b$  — площадь контакта верхней грани ножа с древесиной;  $\mu_b$  — коэффициент трения задней грани ножа о древесину.

У параболического и полукруглого ножа режущая кромка криволинейная и имеет переменный наклон к вектору скорости резания. Характер влияния наклона режущей кромки на усилие резания описан в источнике [1], где автор объединил сумму двух усилий,  $P_H$  и  $P_d$ , в усилие внедрения клинообразной части ножа. Общее усилие резания примет вид:

$$P = P_k \sin \lambda + P_3 + P_b, \quad (6)$$

где  $\lambda$  — угол наклона режущей кромки к вектору скорости резания (рис. 4).

При наклоне режущей кромки под углом  $\lambda$  к вектору скорости возникают две составляющие силы  $P_k$  (рис. 4):  $P_k \cos \lambda$  — сила, которая отжимает нож перпендикулярно вектору скорости резания, и  $P_k \sin \lambda$  — усилие внедрения клинообразной части ножа [1].

Для расчета необходимо определить переменные и постоянные значения. В табл. 1 приведены постоянные данные для расчета усилия резания.

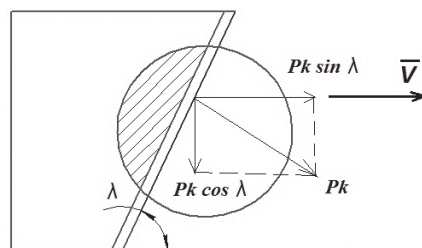


Рис. 4. Зависимость усилия резания лесоматериала прямолезвненным ножом под углом  $\lambda$  к вектору скорости резания

Таблица 1

Исходные данные

Для березы: $q_{дл}$ , $\text{Н/м}^2$	122 000 000
$\rho$ , м	0,00004
$\mu_{дл} = \mu_{дл} = \mu_3 = \mu_b$	0,46
$\delta$ , град.	$30^\circ$
$d_c$ , м	0,8
Для березы: $\sigma_{в.см.}$ , $\text{Н/м}^2$	15 000 000
$t_n$ , м	0,005
Для березы: $K_y$ , $\text{Н/м}^3$	350 000 000

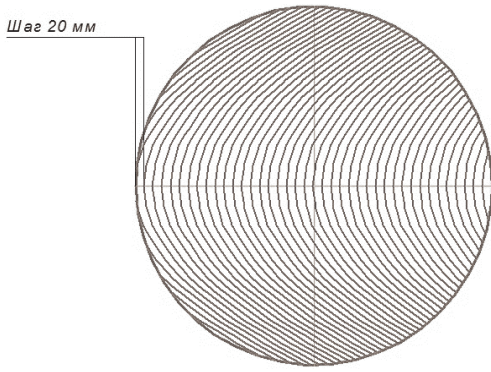
В процессе резания параболическими и полукруглыми плоскими ножами переменными значениями будут: длина ножа, участвующего в резании, угол наклона режущей кромки к вектору скорости, площадь контакта с древесиной верхней и задней грани ножа.

**Определение длины ножа, участвующей в резании в течение всего процесса перерезания.** Формулы (3) и (4) предназначены для расчета ножей с прямолинейной режущей кромкой. Выражение  $2\sqrt{x(d_c-x)}$  в обеих формулах является длиной ножа, участвующей в резании в зависимости от глубины внедрения, для прямолинейной режущей кромки.

Длина ножа, участвующая в резании, для параболической и круглой режущих кромок будет отличной от длины прямолинейной режущей кромки.

Для нахождения длины воспользуемся графоаналитическим методом при помощи программного обеспечения КОМПАС-3D v. 16. На рис. 5 показана схема измерения длины для параболической режущей кромки при перерезании ствола диаметром 0,8 м, шаг измерения равен 0,02 м. Аналогично производим измерения для полукруглой режущей кромки. Полученные данные сводим в табл. 2.

**Определение площади контакта с древесиной по верхней и задней грани ножа.** Тем же графоаналитическим способом в программном обеспечении КОМПАС-3D v. 16 проведем замеры площади контакта с древесиной ножа для резания с параболической и полукруглой режущими кромками, допуская, что площади верхней и задней грани ножа равны  $F_b = F_3$ . Шаг измерения — 0,02 м. Полученные значения сведены в табл. 2.



**Рис. 5.** Схема определения длины параболической режущей кромки, участвующей в резании, в программном обеспечении КОМПАС-3D v. 16

**Определение значения угла  $\lambda$ .** Значения угла  $\lambda$  для параболической и полукруглой режущих кромок будут различными в каждой точке на криволинейных режущих кромках ножей (параболической и полукруглой), поэтому в расчетах будем использовать среднее значение угла.

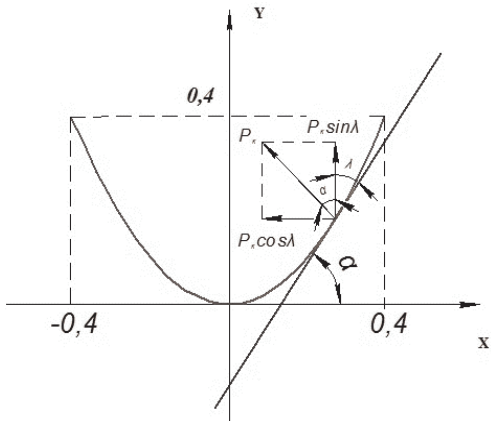
Среднее значение угла резания определим как среднее арифметическое значение в точках на лезвии, длина которого в данный момент участвует в резании. При перерезании длина режущей кромки у обоих ножей будет уменьшаться, а среднее значение угла будет стремиться к  $90^0$ , что видно на рис. 5.

Значения угла  $\lambda$  для параболической и полукруглой функции режущих кромок в точках найдем при помощи касательных функций при  $x: [-0,4;0,4]$  с шагом 0,01, как показано на рис. 6.

Угол  $\lambda$  будет определяться по формуле:

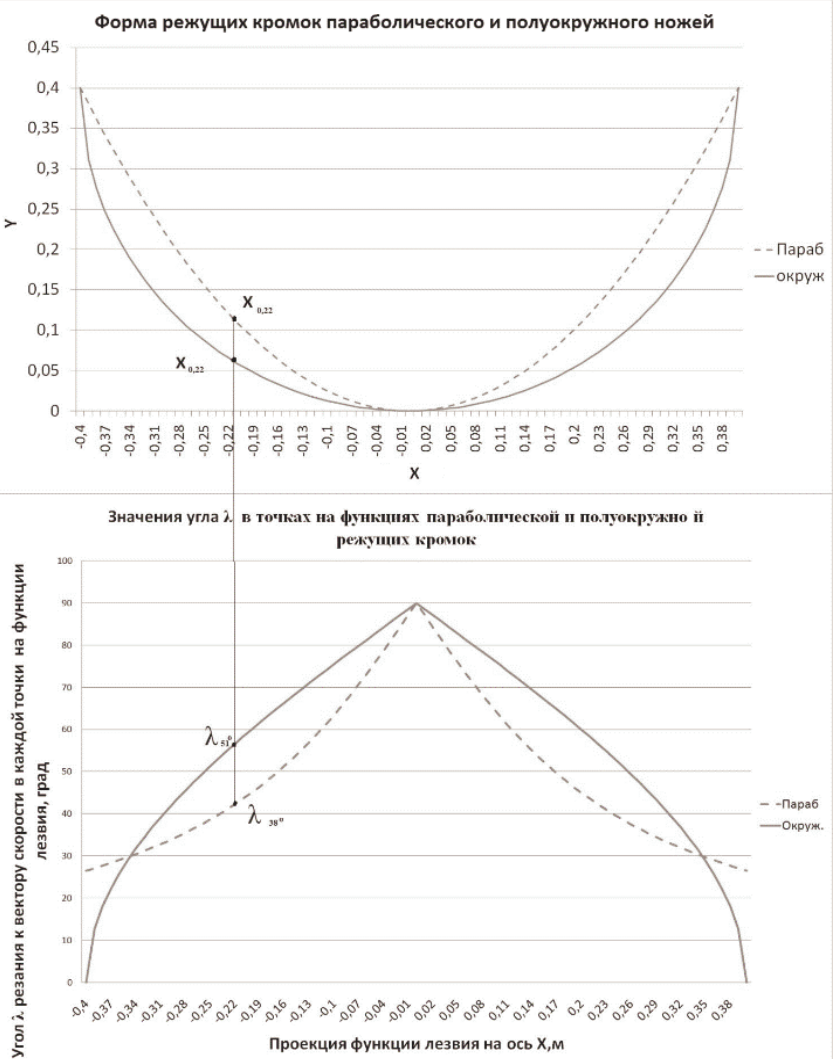
$$\lambda = 90^0 - \alpha ,$$

где  $\alpha$  — угол касательной прямой к функции в любой точке на кривой.



**Рис. 6.** Определение угла  $\lambda$  для параболической режущей кромки

Характер изменения величины угла  $\lambda$  в различных точках на параболической и полукруглой режущих кромках представлен на рис. 7.



**Рис. 7.** Характер изменения величины значений угла  $\lambda$  в точках на функциях параболической и полукруглой режущих кромок

Полученные значения сводим в табл. 2.

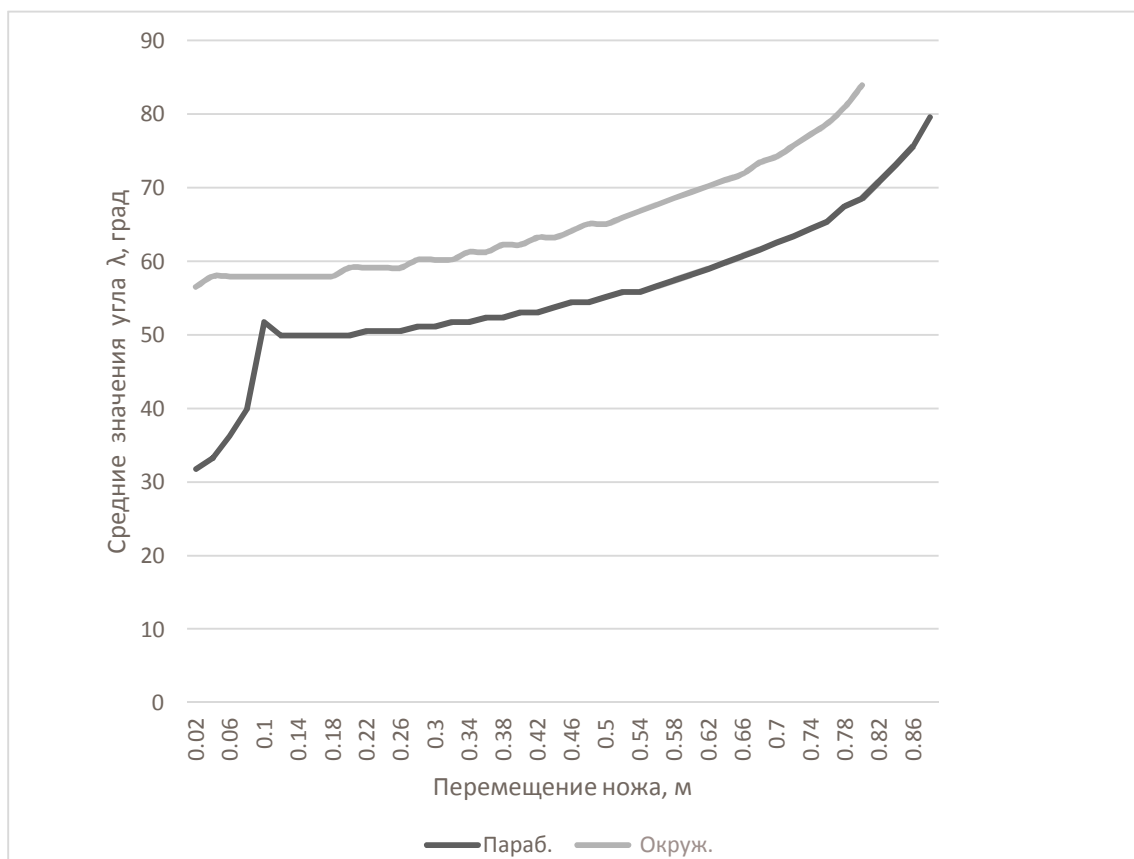


Рис. 8. Зависимость среднего значения угла  $\lambda$  от перемещения ножа

Таблица 2

Переменные значения для расчета усилия резания

$X_{\text{перем.}}, м$	$L_{\text{параб.}}, м$	$L_{\text{окр.}}, м$	$F_{\text{параб.}}, м^2$	$F_{\text{окр.}}, м^2$	$\lambda_{\text{параб. ср.}}, град.$	$\lambda_{\text{окр. ср.}}, град.$
0,02	0,39774	1,25663	0,0027	0,0160	31,8	56,5
0,04	0,57815	1,23663	0,0079	0,0320	33,3	57,9
0,06	0,73028	1,21662	0,0150	0,0480	36,2	57,9
0,08	0,89712	1,19658	0,0245	0,0639	39,8	57,9
0,10	1,10954	1,1765	0,0367	0,0798	51,7	57,9
0,12	1,17722	1,15637	0,0526	0,0956	49,9	57,9
0,14	1,172869	1,13618	0,0686	0,1114	49,9	57,9
0,16	1,16576	1,11591	0,0845	0,1271	49,9	57,9
0,18	1,15634	1,09555	0,1003	0,1428	49,9	57,9
0,20	1,14496	1,075082	0,1160	0,1583	49,9	59,1
0,22	1,13186	1,05449	0,1316	0,1738	50,5	59,1
0,24	1,11724	1,03076	0,1471	0,1891	50,5	59,1
0,26	1,101239	1,01288	0,1624	0,2043	50,5	59,1
0,28	1,08398	0,99182	0,1776	0,2193	51,1	60,2
0,30	1,06354	0,97058	0,1926	0,2342	51,1	60,2
0,32	1,04582	0,94911	0,1974	0,2490	51,7	60,2
0,34	1,02526	0,92742	0,2120	0,2636	51,7	61,2
0,36	1,00392	0,90546	0,2264	0,2780	52,4	61,2
0,38	0,98194	0,88322	0,2406	0,2921	52,4	62,2
0,40	0,95964	0,86066	0,2546	0,3061	53,0	62,2
0,42	0,93676	0,83775	0,2683	0,3199	53,0	63,2
0,44	0,91306	0,81446	0,2818	0,3333	53,7	63,2

$X_{\text{перем.}}, \text{ м}$	$L_{\text{параб.}}, \text{ м}$	$L_{\text{окр.}}, \text{ м}$	$F_{\text{параб.}}, \text{ м}^2$	$F_{\text{окр.}}, \text{ м}^2$	$\lambda_{\text{параб. ср.}}, \text{ град.}$	$\lambda_{\text{окруж. ср.}}, \text{ град.}$
0,46	0,88806	0,7907	0,2951	0,3466	54,4	64,1
0,48	0,86244	0,77655	0,3080	0,3595	54,4	65,1
0,50	0,836126	0,74183	0,3207	0,3722	55,1	65,1
0,52	0,80928	0,71653	0,3332	0,3845	55,8	66,0
0,54	0,78207	0,69056	0,3454	0,3965	55,8	66,8
0,56	0,75446	0,66386	0,3572	0,4081	56,6	67,7
0,58	0,7262	0,63631	0,3688	0,4193	57,3	68,5
0,60	0,69732	0,6078	0,3800	0,4301	58,1	69,4
0,62	0,66344	0,57818	0,3909	0,4405	59,0	70,2
0,64	0,63766	0,54726	0,4014	0,4503	59,8	71,0
0,66	0,60676	0,5148	0,4116	0,4597	60,7	71,8
0,68	0,57512	0,48047	0,4214	0,4684	61,5	73,4
0,70	0,54258	0,44384	0,4307	0,4765	62,5	74,2
0,72	0,50916	0,40428	0,4397	0,4839	63,4	75,7
0,74	0,47464	0,36082	0,4481	0,4904	64,4	77,3
0,76	0,43853	0,3118	0,4561	0,4960	65,4	78,8
0,78	0,40078	0,25404	0,4636	0,5003	67,4	81,0
0,80	0,36066	0,17926	0,4704	0,5027	68,5	83,9
0,82	0,31734	–	0,4766	–	70,8	–
0,84	0,26838	–	0,4821	–	73,1	–
0,86	0,22052	–	0,4867	–	75,6	–
0,88	0,15824	–	0,4904	–	79,5	–

Для расчета общего усилия резания полученные переменные и постоянные значения подставим в формулы (2) – (5), расчетные величины составляющих усилия резания — в формулу (6), силу  $P_k$  найдем как сумму  $P_n$  и  $P_d$ .

График изменения усилия резания при перерезании круглого ствола древесины ножами с параболической и полукруглой режущими кромками представлен на рис. 8.

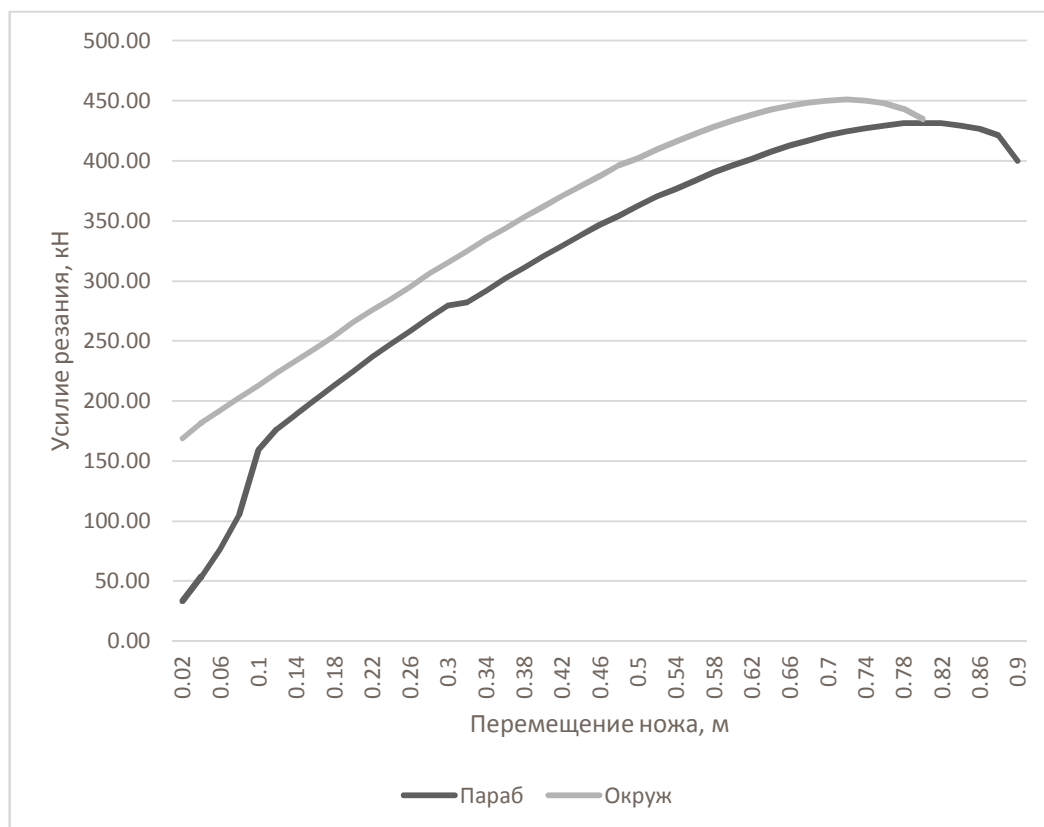


Рис. 9. График изменения усилия резания от перемещения ножей с параболической и полукруглой режущей кромкой

**Обсуждение.** Расчет усилия резания для упакованных отходов лесозаготовок произвести весьма трудно из-за неоднородности состава перерезаемого материала.

В теории резания существует несколько направлений, и единой теории пока не разработано, поэтому для точного определения усилия резания и зависимостей от параметров пакета (среднего диаметра сучьев, породного состава, влажности, температуры и т. д.) необходимо произвести экспериментальные исследования.

### Выводы

Максимальное усилие резания при перерезании полукруглого ножа березового ствола диаметром 0,8 м составило 450,89 кН, для параболического ножа — 431,64 кН. Снижение максимального усилия составило 4,2 %. При перерезании параболическим ножом произошло увеличение хода ножа на 0,08 м.

Таким образом, использование ножей с параболическими режущими кромками на пакетирующихся отходах лесозаготовок позволит снизить усилия резания без изменения конструкции раскрывочных устройств.

### Литература

1. Овчинников В.В. Оборудование бесстружечной разделки лесоматериалов. М.: Лесная промышленность, 1990. С. 224.
2. Ширнин Ю.А. Технология и машины лесосечных работ: Йошкар: МарГТУ, 2004. 304 с.
3. Global [Электронный ресурс]: Web-сайт Monra Forestal. URL: <http://monraforestal.com/unidadcorte.html> (дата обращения: 13.03.2017).
4. Sánchez-García S., Eliasson L., Tolosana E., Majada I., Canga E. Evaluation of technological improvements in bundling units for the collection of eucalyptus logging residues on steep terrain in Spain. 2013. [Электронный ресурс]. URL: <http://revistas.inia.es/index.php/fs/article/view/6034/2539> (дата обращения: 20.03.2017).
5. Moskalik T., Sadowski J., Sarzyński W., Zastocki D. Efficiency of slash bundling in mature coniferous stands // Faculty of Forestry, Warsaw University of Life Sciences - SGGW, Warsaw, Poland. 2013 [Электронный ресурс]. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/16a0/c42fe84e53e3c4033717c7007ec6af74c78b.pdf> (дата обращения: 1.04.2017).
6. Кочегаров В.Г. Технология и машины лесосечных работ: М.: Лесная промышленность, 1990. 392 с.
7. Захаров В.В. Импульсное резание древесины. М.: Лесная промышленность, 1983. 160 с.
8. Матросов А.В., Быковский М.А. Современные машины и оборудования для пакетирования лесосечных отходов и тонкомерной древесины // Лесной вестник. 2014. № 2. С. 56-61.
9. Воскресенский С.А. Резание древесины. М.; Л.: Голесбумиздат, 1955. 200 с.
10. Wasterland I., Ohlund A. Productivity Study of WoodPac Bundling of Logging Residues and small stems [Электронный ресурс]. URL: [http://www.crojfe.com/r/i/crojfe\\_35-2\\_14/wasterlund.pdf](http://www.crojfe.com/r/i/crojfe_35-2_14/wasterlund.pdf) (дата обращения: 14.04.2017).
11. Laitila J., Kilponen M., Nuutinen Y. Productivity and Cost-efficient of Bundling logging residues at roadside landing

[Электронный ресурс]. URL: [http://www.crojfe.com/r/i/laitila\\_175-187.pdf](http://www.crojfe.com/r/i/laitila_175-187.pdf) (дата обращения: 14.04.2017).

12. Гаврилов П.П. Обоснование конфигураций спирально-ступенчатых ножей для поперечного бесстружечного резания лесоматериалов: дис. ... канд. тех. наук. М., 2001. С. 25-28.

13. Суханов Ю.В., Герасимов А.А., Селиверстов А.А., Соколов А.П. Технологические цепочки и системы машин для сбора и переработки древесной биомассы в топливную щепу при сплошнолесосечной заготовке в сортиметах. [Электронный ресурс]. URL: [http://brstu.ru/static/unit/journal\\_smt/docs/number12/101-107.pdf](http://brstu.ru/static/unit/journal_smt/docs/number12/101-107.pdf) (дата обращения: 1.04.2017).

14. Пиир А.Э., Кунтыш В.Б., Мелехов В.И. Выбор древесного топлива для малой энергетики // Изв. ВУЗов. Лесной журнал. 2014. № 1. С. 101-109.

15. Леонов Е.А., Федоренчик А.С. Состояние и проблемы утилизации низкокачественной древесины в энергетических целях в Беларуси // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы междунар. науч.-технической конф. (Вологда, 2-3 дек. 2014 г.). Минск, 2014. С. 49-51.

16. Суханов Ю.В. Выбор оптимальной технологии сбора отходов лесозаготовок для получения топливной щепы // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы междунар. науч.-технической конф. (Вологда, 7-8 дек. 2010 г.). Петрозаводск, 2011. С. 49-51.

17. Пискунов М.А. Опыт заготовки низкокачественной древесины и лесосечных отходов для энергетических целей в Финляндии // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы междунар. науч.-технической конф. (Вологда, 6-8 дек. 2011 г.). Петрозаводск, 2012. С. 64-65.

18. Slash Bundler. New opportunities. Energy from the woods. John Deere 1490D [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cableprice.co.nz/downloads/1490D.pdf> (дата обращения: 14.02.2017).

19. Steven Meadows. Optimizing the Use of a John Deere Slash Bundling Unit in a Tree-Length Logging System [Электронный ресурс]. URL: <http://etd.auburn.edu/bitstream/handle/10415/2168/Format%20edits.pdf?sequence=2> (дата обращения: 15.04.2017).

20. Thomas Seifert Editor. Bioenergy from Wood Sustainable Production in the Tropics. [Электронный ресурс] URL: <http://www.twirpx.com/file/1342087/> (дата обращения: 01.06.2015).

### References

1. Ovchinnikov V.V. Equipment of chipless timber cutting. M.: Lesnaya promyshlennost', 1990. P. 224.
2. Shirnin Yu.A. Technology and logging machines: Ioshkar: MarGTU, 2004. 304 p.
3. Global [Elektronnyi resurs]: Web-sait Monra Forestal. URL: <http://monraforestal.com/unidadcorte.html> (data obrashcheniya: 13.03.2017).
4. Sánchez-García S., Eliasson L., Tolosana E., Majada I., Canga E. Evaluation of technological improvements in bundling units for the collection of eucalyptus logging residues on steep terrain in Spain. 2013. [Elektronnyi resurs]. URL: <http://revistas.inia.es/index.php/fs/article/view/6034/2539> (data obrashcheniya: 20.03.2017).
5. Moskalik T., Sadowski J., Sarzyński W., Zastocki D. Efficiency of slash bundling in mature coniferous stands // Faculty of

Forestry, Warsaw University of Life Sciences - SGGW, Warsaw, Poland. 2013. [Elektronnyi resurs]. URL: [https:// pdfs. semantic-scholar.org/16a0/c42fe84e53e3c4033717c7007ec6af74c78b.pdf](https://pdfs.semanticscholar.org/16a0/c42fe84e53e3c4033717c7007ec6af74c78b.pdf) (data obrashcheniya: 1.04.2017).

6. Kochegarov V.G. Technology and logging machines: textbook for universities: M.: Lesnaya promyshlennost', 1990. 392 p.

7. Zakharov V.V. Impulse cutting of wood. M.: Lesnaya promyshlennost', 1983. 160 p.

8. Matrosov A.V., Bykovskii M.A. Modern machinery and equipment for packaging of logging waste and small sized wood // Forestry Bulletin. 2014. № 2. P. 56-61.

9. Voskresenskii S.A. Cutting wood. M.; L.: Golesbumizdat, 1955. 200 p.

10. Wasterland I., Ohlund A. Productivity Study of WoodPac Bundling of Logging Residues and small stems [Elektronnyi resurs]. URL: [http://www.crojfe.com/r/i/crojfe\\_35-2\\_14/wasterlund.pdf](http://www.crojfe.com/r/i/crojfe_35-2_14/wasterlund.pdf) (data obrashcheniya: 14.04.2017).

11. Laitila J., Kilponen M., Nuutinen Y. Productivity and Cost-efficient of Bundling logging residues at roadside landing [Elektronnyi resurs]. URL: [http://www.crojfe.com/r/i/laitila\\_175-187.pdf](http://www.crojfe.com/r/i/laitila_175-187.pdf) (data obrashcheniya: 14.04.2017).

12. Gavrilov P.P. The rationale for the configurations of spiral-step knives for cross chipless timber cutting: dis. ... kand. tekhn. nauk. M., 2001. P. 25-28.

13. Sukhanov Yu.V., Gerasimov A.A., Seliverstov A.A., Sokolov A.P. Technological chains and machine systems for harvesting and conversion of woody biomass to fuel chips in case of clear-felling wood assortment preparation. [Elektronnyi resurs]. URL: [http://brstu.ru/static/unit/journal\\_smt/docs/number12/101-107.pdf](http://brstu.ru/static/unit/journal_smt/docs/number12/101-107.pdf) (data obrashcheniya: 1.04.2017).

14. Piir A.E., Kunttysh V.B., Melekhov V.I. Selection of fuel-wood for Small Energy // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2014. № 1. P. 101-109.

15. Leonov E.A., Fedorenchik A.S. The state and the problems of utilization of low-quality wood for energy purposes in Belarus // Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: materialy mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoi konf. (Vologda, 2-3 dek. 2014 g.). Minsk, 2014. P. 49-51.

16. Sukhanov Yu.V. Choosing the best technology of forest waste harvesting for getting fuel chips // Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: materialy mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoi konf. (Vologda, 7-8 dek. 2010 g.). Petrozavodsk, 2011. P. 49-51.

17. Piskunov M.A. Experience in harvesting of low-quality wood and logging waste for energy purposes in Finland // Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: materialy mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoi konf. (Vologda, 6-8 dek. 2011 g.). Petrozavodsk, 2012. P. 64-65.

18. Slash Bundler. New opportunities. Energy from the woods. John Deere 1490D [Elektronnyi resurs]. URL: <https://www.cableprice.co.nz/downloads/1490D.pdf> (data obrashcheniya: 14.02.2017).

19. Steven Meadows. Optimizing the Use of a John Deere Slash Bundling Unit in a Tree-Length Logging System [Elektronnyi resurs]. URL: <http://etd.auburn.edu/bitstream/handle/10415/2168/Format%20edits.pdf?sequence=2> (data obrashcheniya: 15.04.2017).

20. Thomas Seifert Editor. Bioenergy from Wood Sustainable Production in the Tropics. [Elektronnyi resurs] URL: <http://www.twirpx.com/file/1342087/> (data obrashcheniya: 01.06.2015).