

УДК 674.05(075.8)

## О необходимости дополнительных исследований энергоемкости процесса поперечного пиления древесины

И.В.Григорьев<sup>1, a</sup>, Е.Г.Хитров<sup>1, b</sup>, Ю.Н.Власов<sup>1, c</sup>, В.А.Иванов<sup>2, d</sup>, В.И.Жданович<sup>2, e</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, Институтский переулок 5, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Братский государственный университет, Макаренко 40, Братск, Россия

<sup>a</sup>tlzp@inbox.ru, <sup>b</sup>yegorkhitrov@gmail.com, <sup>d</sup>ivanovva55@mail.ru

Статья получена 9.09.2013, принята 19.11.2013

*В статье показано влияние основной удельной работы резания при пилении древесины цепными пилами на общие энергозатраты при поперечном пилении древесины. Проведено сравнение опубликованных данных о значениях основной удельной работы резания, взятых из трудов В.Г. Кочегарова, Б.Г. Залегаллера, показано существенное (до 20 %) отклонение друг от друга расчетных значений основной удельной работы резания при пилении древесины цепями при использовании различных методик расчета указанной величины. Обоснована важность проведения дополнительных исследований энергоемкости процесса поперечного пиления древесины цепными пилами. Предложена методологическая основа проведения экспериментальных исследований по определению основной удельной работы резания при поперечном пилении древесины цепями, освещены перспективы дальнейших исследований в указанном направлении. В частности, предложен адаптированный под исследование процесса поперечного пиления древесины подход, основанный на положениях общей прикладной теории измельчения материалов; проанализирована возможность применения основных положений механики разрушения материалов при определении численных значений основной удельной работы резания при поперечном пилении древесины цепными пилами. Показана связь упругих постоянных древесины (а именно – модуля упругости древесины при сжатии поперек волокон) и удельной работы резания при пилении.*

**Ключевые слова:** пиление древесины, поперечное пиление, энергоемкость, цепные пилы, удельная работа резания.

## The need for further research of energy consumption for timber cross-cutting

I.V. Grigor'yev<sup>1, a</sup>, E. G. Khitrov<sup>1, b</sup>, Yu.N. Vlasov<sup>1, c</sup>, V. A. Ivanov<sup>2, d</sup>, V.I. Zhdanovich<sup>2, e</sup>

St. Petersburg State Forest Technical University, 5 Institutsky lane, St. Petersburg, Russia

Bratsk State University, 40 Makarenko St, Bratsk, Russia

<sup>a</sup>tlzp@inbox.ru, <sup>b</sup>yegorkhitrov@gmail.com, <sup>d</sup>ivanovva55@mail.ru

Received 9.09.2013, accepted 19.11.2013

*The paper focuses on the influence of the main specific work when sawing wood with chain saws on the overall energy consumption when timber cross-cutting. There has been conducted a comparison of the published data on the basic values of the specific cutting work taken from the works by V.G. Kochegarov, B.G. Zalegaller. A significant (up to 20%) deviation of the calculated values of the specific cutting work from each other at cutting wood with chains when using different methods for calculating the specified value has been demonstrated. The paper substantiates the importance of further research of energy consumption of the process of timber cross-cutting with chain saws. A methodological framework for the pilot studies to determine the principal specific work of timber cross-cutting using chain saws has been proposed, the prospects for further research in this regard have been highlighted. In particular, the approach adapted to study the process of timber cross-cutting and based on the provisions of the general applied theory of materials grinding has been proposed. The possibility of applying the basic provisions of the fracture mechanics of materials to determine the numerical values of the basic values of the specific cutting work in the process of timber cross-cutting using chain saws has been analyzed. Also, the dependence between the elastic constants of wood, namely, the elasticity modulus of wood under cross-grain compression, and the specific cutting when sawing.*

**Keywords:** wood sawing, cross-cutting, energy intensity, chain saws, specific cutting work.

**Введение.** Общеизвестно, что поперечное пиление древесины цепными пилами – неотъемлемая составляющая большинства технологических операций лесозаготовительного производства. Исследованию процесса пиления древесины, в более общем случае – теории резания древесины, посвящено большое количество научных работ. Внимание исследователей в значитель-

ной мере сосредоточено на вопросе энергоемкости этого процесса [1, 2].

Интерес исследователей, на наш взгляд, определяется следующим. По рассчитанному значению потребляемой мощности далее возможно обоснование установленной мощности двигателя пилы, что является одним из важнейших параметров при компоновке систем машин для лесозаготовок.

Нужно отметить еще одно обстоятельство, делающее вопрос определения энергоемкости пиления древесины цепными пилами актуальным: в последние годы все большее внимание уделяется экологическому и энергетическому аспектам лесозаготовительного производства. К традиционным критериям оптимальности технологического процесса лесозаготовки, таким, как минимизация стоимости заготовки древесины, повышение производительности труда, уверенно добавляется такой критерий, как минимизация удельных энергозатрат на заготовку древесины. Наиболее универсальным показателем качества процесса лесозаготовки является энергетическая эффективность, получаемая как разность энергоемкости продуктов лесопользования и затрат на все фазы получения продуктов лесопользования [3].

Очевидно, что в этой связи для выбора оптимальной технологии заготовки древесины необходима четкая оценка затрат энергии на стадии выполнения каждой технологической операции сравниваемых на предмет оптимальности технологических процессов.

**Целью** настоящей работы являются анализ и сравнение результатов расчетов удельной работы резания при пиление древесины цепными пилами по различным методикам; обоснование необходимости проведения дальнейших исследований энергоемкости процесса поперечного пиления древесины цепными пилами, а также разработка методологических основ последующих исследований этого процесса.

**Материалом для исследований** служат труды признанных отечественных ученых в области лесозаготовительного производства и древесиноведения.

**Результаты исследований.** Отечественными учеными предложены сравнительно простые зависимости, позволяющие на практике определить мощность, потребляемую при поперечном пиление древесины цепными пилами, в зависимости от характеристик предмета труда (порода древесины, ее состояние, температура  $T$  и абсолютная влажность  $W$ ), характеристик пропила (ширина  $b$  и высота пропила  $H$ ), параметров, относящихся к пиле (шаг зубьев цепи  $t_3$ , время работы без заточки  $T_3$ ) и процессу пиления (скорость резания  $v$ , скорость подачи пилы  $u$ ).

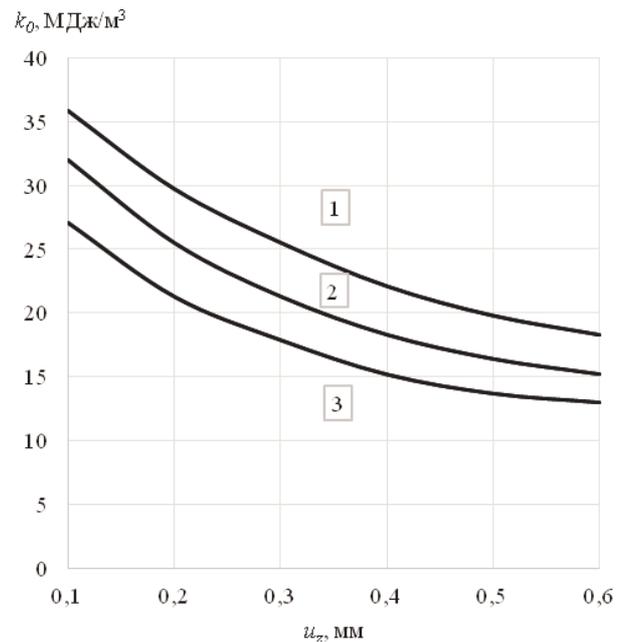
Методика работы с предложенными зависимостями следующая: вначале задаются шириной пропила  $b$  и величиной подачи на зуб  $u_z$ , затем определяют значение основной удельной работы резания при пиление  $k_0$  по формуле [4]:

$$k_0 = \frac{2,65 \cdot 10^5}{(u_z b)^{0,33}} \quad (1)$$

Отметим, что в прикладной теории измельчения рассматривается ряд закономерностей, связывающих затраченную на измельчение материала работу со степенью его измельчения (отношение средневзвешенной фракции материала до и после измельчения) [5]. Принимая во внимание общеизвестный факт о связи фракции опилок и подачи на зуб пилы, можно предположить целесообразность применения положений прикладной теории измельчения к исследованию энергоемкости поперечного пиления древесины. Однако, поскольку в настоящее время отсутствуют опубликованные систематизированные результаты исследований фракционного состава опилок в зависимости от подачи на зуб пилы, эта возможность может обсуждаться лишь после получения дополнительных экспериментальных сведений.

После определения значения основной удельной работы резания при пиление определяют непосредственно удельную работу резания при пиление  $k$  с использованием поправочных коэффициентов на породу  $a_D$ , влажность  $a_W$  и состояние древесины  $a_T$ , затупление пильной цепи  $a_c$ .

В [6] также предлагают график (рис. 1) и таблицу (табл. 1) для определения основной удельной работы резания, при этом указывая их как альтернативу формуле (1).



**Рис. 1.** График для определения основной удельной работы резания при пиление древесины цепными пилами [4], [6]: 1 – ширина пропила 5 мм; 2 – ширина пропила 8 мм; 3 – ширина пропила 12 мм

Таблица 1

Основная удельная работа резания при пиление древесины цепными пилами [6]

$b$ , мм	$u_z$ , мм						
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,7	1	
8	29,3	22,5	20,6	19,6	16,6	13	
12	25,4	19,6	17,6	16,6	13	11,6	
18	21,5	17,6	15,2	13,6	11,6	10,2	
25	19,6	15,2	13,6	11,6	10,2	9,4	

Сравним результаты расчетов по формуле (1) с данными графика на рис. 1 и табл. 1 (см. рис. 2).

Таблица 2

Результаты сравнения расчетных значений основной удельной работы резания

$b, \text{ мм}$	$u_z, \text{ мм}$	$k_0, \text{ МДж/м}^3$			$\Delta_{1-2}, \%$	$\Delta_{1-3}, \%$	$\Delta_{2-3}, \%$
		формула (1)	график по рисунку 1	данные таблицы 1			
		(1)	(2)	(3)			
8	0,4	17,2	18,3	19,6	6	14	7
8	0,3	19	21,3	20,6	12	8	3
8	0,2	21,7	25,5	22,5	18	4	13
8	0,1	27,2	32	29,3	18	8	9
12	0,4	15,1	15,2	16,6	1	10	8
12	0,3	16,6	17,9	17,6	8	6	2
12	0,2	19	21,3	19,6	12	3	9
12	0,1	23,8	27,1	25,4	14	7	7

$\Delta_{i-j}$  – отклонение в процентах значения основной удельной работы резания по столбцу с номером  $j$  от значения по столбцу с индексом  $i$

Анализ результатов сравнения показывает, что расчетные значения основной удельной работы резания, полученные по разным методикам, существенно отличаются друг от друга.

Рассмотрим важность расчета удельной работы при планировании расходов предприятия, для чего оценим процентные отклонения значений основной удельной работы резания в денежном эквиваленте.

Пусть на лесосеке работает бригада, оснащенная тремя бензиномоторными пилами, для выполнения валки, очистки от сучьев и раскряжевки. Примем расход бензина при работе одной пилы на лесосеке 1,08 кг/час [7], часовую производительность по каждой операции – 3,5 м<sup>3</sup>/час [7]. Тогда получим приблизительно, что на заготовку 1 м<sup>3</sup> древесины будет затрачено 0,93 кг бензина. При годовом объеме заготовки 100 тыс. м<sup>3</sup> расход бензина составит 93000 кг. Поскольку расход бензина является функцией в т. ч. потребляемой на пиление мощности, уместно предположить прямо пропорциональную связь основной удельной работы резания с расходом топлива. Тогда, в зависимости от основной удельной работы резания, расход топлива будет колебаться в пределах 20 %, т. е. в пределах 18600 кг, что при цене бензина 35 рублей за килограмм составит 651000 рублей. На наш взгляд, эта цифра значительна. Еще раз подчеркнем, что речь здесь идет лишь о планировании производственных затрат.

Относительно расчета удельной работы резания с помощью поправочных коэффициентов автор [4] прямо указывает, что эта методика «неточно отражает влияние отдельных факторов на величину  $k$ , так как, например, изменение влажности у различных пород по-разному сказывается на величине удельной работы резания».

Если принять во внимание связь между модулем деформации древесины, а также ее пределом прочно-

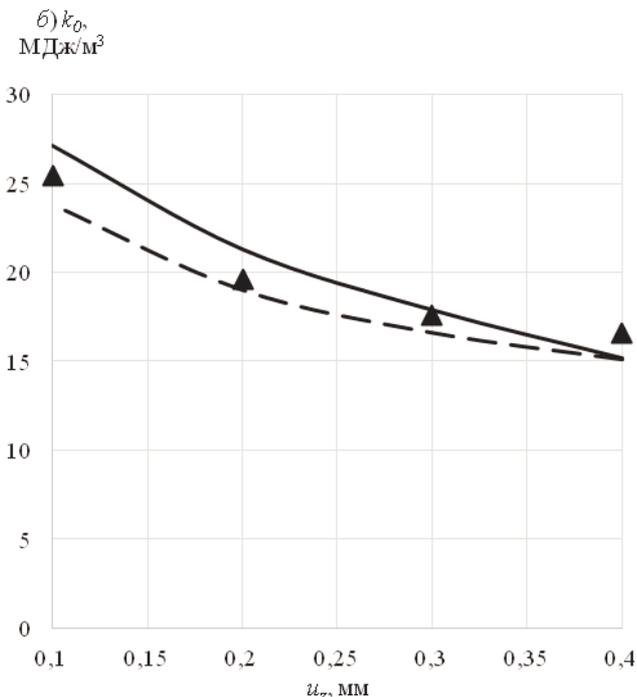
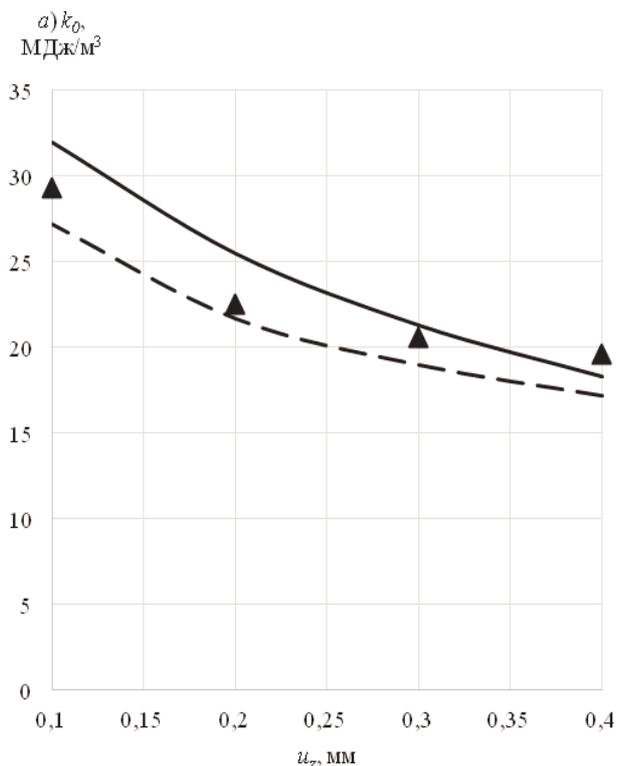


Рис. 2. Сравнение расчетных значений основной удельной работы резания: а) основная удельная работа резания при ширине пропила 8 мм; б) основная удельная работа резания при ширине пропила 12 мм; маркеры – данные таблицы 1; сплошные линии – расчет по формуле (1); пунктирные линии – значения по графику [5]

Результаты сравнения расчетных значений между собой представлены в табл. 2.

сти с температурой, плотностью, породой и влажностью [8], то приведенное выше утверждение подтвердится в контексте общей теории измельчения и механики разрушения, связывающей работу, затрачиваемую

на измельчение (разрушение), с модулем деформации материала [9].

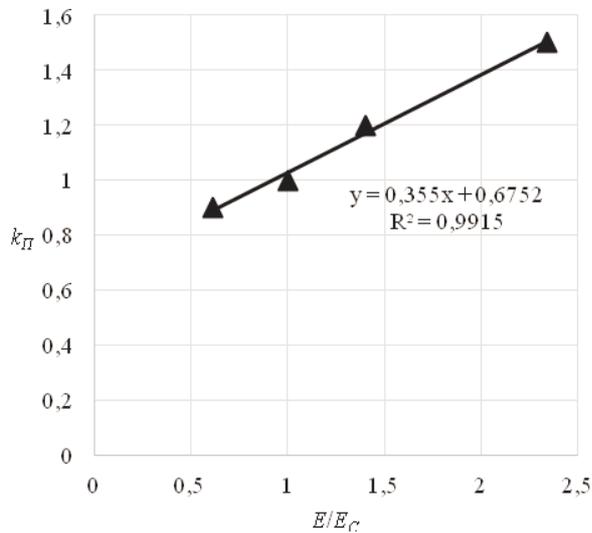
Поясним это примером, в связи с чем рассмотрим табл. 3 и график на рис. 3.

Таблица 3

Модуль упругости при сжатии поперек волокон [10],  
поправочный коэффициент на породу при пилении древесины [6]

Порода древесины	$E$ , МПа	$E/E_c$	$k_{II}$
Ель	407	0,61	0,9
Сосна	664	1	1
Береза	931	1,4	1,2
Дуб	1555	2,34	1,5

$E_c$  – модуль упругости древесины сосны при сжатии поперек волокон



**Рис. 3.** Зависимость поправочного коэффициента на породу при расчете удельной работы резания при пилении древесины от отношения модуля упругости древесины при сжатии поперек волокон к модулю упругости воздушно-сухой древесины сосны при сжатии поперек волокон

Рассчитанное значение коэффициента линейной корреляции  $r^2 = 0,93$  свидетельствует о тесной пропорциональной связи  $k_{II}$  и модуля упругости  $E$ , дополнительно это подтверждается близким к единице коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9915$  аппроксимирующей зависимости для  $k_{II}$ :

$$k_{II} = 0,355 \frac{E}{E_c} + 0,6752 \quad (2)$$

Отметим недостаток сведений о влиянии температуры и влажности древесины на ее способность сопротивляться деформированию. Это делает невозможным дальнейшее развитие методов расчета энергоемкости процесса поперечного пиления древесины.

Отсутствуют исследования взаимовлияния поправочных коэффициентов на условия пиления. Поправка на затупление зубьев пилы дается только по времени

работы без заточки, не учитывая при этом материал зубьев и древесный материал, подвергающийся распиловке. Хотя очевидно, что в мороз при распиловке твердых пород зубья будут тупиться быстрее. При этом практически линейно будет расти сила отжима пилы, а значит и сила сопротивления перемещению цепи по шине [6].

Поправку на отрицательную температуру учитывают уравнением [6]:

$$a_i = 1 + 0,1\sqrt[3]{T}, \quad (3)$$

где  $T$  – абсолютное значение отрицательной температуры,  $^{\circ}\text{C}$ .

При этом совершенно не учитывается влажность древесины, хотя очевидно, что в мороз жидкость будет образовывать ледяной скелет, существенно увеличивающий силу сопротивления резанию.

В поправочные коэффициенты условий пиления не входит поправка на скорость резания, в отличие от резания резцом [6]. Это также нельзя признать корректным, поскольку в настоящее время все большее распространение получают высокоскоростные безредукторные бензиномоторные пилы с малой подачей на зуб и большой скоростью резания. Установлено, что при больших скоростях резания перед лезвием зуба возникает эффект, аналогичный гидравлическому удару. Под воздействием удара стенки клеток древесины уплотняются и разрываются. Учитывая весьма малую сжимаемость жидкости, возникает явление, аналогичное увеличению твердости материала перед лезвием. При этом качество формируемой лезвием поверхности является невысоким в связи с тем, что волокна древесины разрушаются не только на лезвии, но и перед ним, причем, имеют место объемные, неупорядоченные разрушения. Кроме этого, при высоких скоростях резания, под воздействием сил трения лезвие сильно нагревается, что может приводить к мгновенному вскипанию жидкости в клетках, соприкасающихся с лезвием, что также будет способствовать неупорядоченным разрушениям структуры древесины и увеличению сил сопротивления резанию [11].

Касательно влияния плотности воздушно-сухой древесины на ее упругие постоянные можно отметить характер связи указанных величин, близкий к линейному [8].

В свете изложенного дальнейшие исследования энергоемкости процесса поперечного пиления древесины пыльными цепями с использованием положений общей теории измельчения и механики разрушения представляются актуальными для теории и востребованными на практике.

#### Выводы

1. Проведенный анализ литературных источников по проблематике определения энергоемкости процесса поперечного пиления древесины цепными пилами показал существенное (до 20 %) различие значений основной удельной работы резания, получаемых по разным методикам расчета.

2. На практике различие в расчетных значениях основной удельной работы резания может привести к искажению прогноза затрат на заготовку древесины. Так, например, по приближенной оценке, расчетная себестоимость заготовки 100 тыс. м<sup>3</sup> хвойной древесины по сортиментной технологии с использованием бензиномоторных пил может различаться на сумму 651 тыс. рублей за счет разницы в количестве бензина, затраченного при заготовке древесины.

3. Анализ литературных источников показал необходимость дальнейшего развития, совершенствования методики расчета удельной работы резания при пилении древесины. Основное внимание следует уделить влиянию температуры, влажности, плотности и породы древесины с учетом их совместного влияния на удельную работу резания при пилении.

4. Расчеты доказали корреляцию поправочного коэффициента на породу древесины при поперечном пилении и модуля упругости древесины при сжатии поперек волокон ( $r^2 = 0,93$ ). Это дает основание использовать положения механики разрушения и общей теории измельчения при проведении последующих экспериментальных исследований и при дальнейшем развитии теории резания древесины.

#### Литература

1. Григорьев И.В., Иванов В.А., Вернер Н.Н., Елизаров Ю.М., Чуднов Ю.Н. Влияние качества изготовления пыльных цепей на энергетическую эффективность процесса пиления // Вестн. Крас. гос. агр. ун-та. 2011. № 4. С. 140-144.
2. Александров И.К., Григорьев И.В., Иванов В.А., Елизаров Ю.М., Чуднов Ю.Н. Методика определения топливной экономичности бензиномоторных пил // Там же. 2010. № 2. С. 112-117.
3. Григорьев И.В., Никифорова А.И., Григорьева О.И., Куницкая О.А. Обоснование методики оценки экологической эффективности лесопользования // Там же. 2012. № 6. С. 72-77.
4. Бауман В.А. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. М.: Машиностроение, 1975. 340 С.
5. Григорьев И.В., Тихонов И.И., Куницкая О.А. Технология и машины лесосечных работ. СПб.: СПбГЛТУ, 2013. 132 с.
6. Пестриков В.М., Морозов Е.М. Механика разрушения твердых тел: курс лекций. СПб.: Профессия, 2002. 320 С.
7. Вигдорович А. И., Сагалаев Г.В., Поздняков А.А. Древесные композиционные материалы в машиностроении: справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1991. 240 с.
8. Григорьев И.В., Вернер Н.Н. Расчет надежности пыльных цепей // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2008. Вып. № 185. С. 100-109.

#### References

1. Grigor'yev I.V., Ivanov V.A., Verner N.N., Elizarov Yu.M., Chudnov Yu.N. Effect of the saw chains quality on energy efficiency of the process // Vestn. Kras. gos. agr. un-ta. 2011. № 4. S. 140-144.
2. Aleksandrov I.K., Grigor'yev I.V., Ivanov V.A., Elizarov Yu.M., Chudnov Yu.N. The technique to determine fuel efficiency of petrol saws // Vestn. Kras. gos. agr. un-ta. 2010. № 2. S. 112-117.
3. Grigor'yev I.V., Nikiforova A.I., Grigor'yeva O.I., Kunitskaya O.A. The substantiation of the technique for ecological efficiency of forest exploitation // Vestnik Kras. gos. agr. un-ta. 2012. № 6. S. 72-77.
4. Bauman V.A. Mechanical equipment of the enterprises to produce building materials, products and constructions. M.: Mashinostroeniye, 1975. 340 s.
5. Grigor'yev I.V., Tikhonov I.I., Kunitskaya O.A. Technology and machines for felling-area works. SPb.: SPbGLTU, 2013. 132 s.
6. Pestrikov V.M., Morozov E.M. Mechanics of solid bodies destruction: kurs lektiy. SPb.: Professiya, 2002. 320 s.
7. Vighdorovich A. I., Sagalaev G.V., Pozdnyakov A.A. Wood composite materials in engineering: spravochnik. M.: Mashinostroeniye, 1991. 240 s.
8. Grigor'yev I.V., Verner N.N. Reliability calculation for saw chains // Izv. S.-Peterb. Lesotekhn. akad. 2008. Vyp. № 185. S. 100-109.