

## РАСЧЕТ И АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ПРОДОЛЬНОЙ РАСПИЛОВКИ ДРЕВЕСИНЫ НА КРУГЛОПИЛЬНЫХ СТАНКАХ

Многие лесозаготовительные и лесопильные предприятия в целях рационального и более полного использования древесины производят механическую переработку тонкомерной, низкосортной и дровяной древесины на различные пиломатериалы, применяя для этой цели круглопильные станки различных конструкций. Кроме того, на ряде нижних складов леспромхозов и ряде лесопильных предприятий построены или строятся цехи по первичной переработке древесины с использованием круглопильных станков на продольной распиловке круглого леса на пиломатериалы. Обусловлено это тем, что однопильные и многопильные круглопильные станки, как показал опыт работы лесопильных цехов и предприятий, являются наиболее эффективным оборудованием для выпилки различных пиломатериалов из тонкомерной, низкокачественной и дровяной древесины [4].

Круглопильные станки более производительны по сравнению с другим оборудованием, имеют меньший вес и более просты по конструкции. На строительство цехов на базе круглопильных станков не требуются большие капиталовложения. Благодаря этому круглопильные станки, применяемые для продольной распиловки древесины в лесной промышленности, составляют в настоящее время около 40% станочного парка. В связи с этим увеличение производительности круглопильных станков имеет большое народнохозяйственное значение.

Однако достичь высокой производительности круглопильных станков при наименьших энергозатратах и высоком качестве продукции можно лишь при правильном выборе оптимальных режимов продольной распиловки древесины. А чтобы правильно выбирать режимы пиления, необходимо знать факторы, влияющие на процесс продольной распиловки круглого леса.

Имеющиеся исследования, выполненные применительно к условиям леспромхозов и лесозаводов, не позволяют разработать инструкции, по которым можно было бы устанавливать оптимальные режимы работы круглопильных станков для данных условий, так как они выполнены по разнородным

методикам и не охватывают всех основных факторов, влияющих на режимы продольной распиловки древесины круглыми пилами. Учитывая это, нами были проведены специальные исследования режимов продольной распиловки бревен влажностью более 30% на круглопильном станке с переключением в широком диапазоне основных факторов, влияющих на режимы пиления.

В результате было установлено, что наиболее благоприятные условия продольного пиления древесины с точки зрения качества продукции создаются при минимальном кинематическом угле встречи для данных конкретных условий. Этот угол будет минимальным тогда, когда вершины зубьев пилы выступают над распиливаемым материалом примерно на 20 мм.

Было также установлено, что диаметр пил не влияет на силовые параметры при продольном пилении древесины при условии сохранения постоянными угла встречи  $\Theta$  и толщины стружки  $e$ , а количество пил на пильном валу влияет на силовые параметры прямо пропорционально.

Чистота поверхности пропила находится в прямой зависимости от толщины стружки  $e$  и ухудшается с увеличением  $e$ .

Однако наихудшая чистота поверхности пропила по высоте оказалась не в месте выхода зубьев пилы из пропила, где толщина стружки наибольшая, а по середине высоты пропила. Причем доминирующими неровностями по середине пропила были вырывы, а не риски. Обусловлено это тем, что при продольной распиловке бревен и брусьев, заготовленных из бревен, траектория зуба по середине высоты пропила является касательной к годичным слоям. Это создает наиболее благоприятные условия для образования вырывов за счет отрыва целых пучков волокон ранней части годичного слоя по поверхности наименее прочной связи с поздним слоем.

На чистоту поверхности пиломатериалов влияют также качество подготовки пильных дисков к работе и их вибрация. Даже незначительные отклонения в величине развода зубьев пилы ухудшают чистоту поверхности пиломатериалов за счет увеличения глубины рисков.

Высота пропила и скорость резания практически не влияют на чистоту поверхности пропила (класс чистоты поверхности пропила остается постоянным при изменении высоты пропила и скорости резания), если толщина стружки при этом не изменилась.

Прямой и тесной связи между колебаниями пильного диска в процессе пиления и чистотой поверхности пропила не установлено.

Колебания пильных дисков при правильной их подготовке к работе незначительны (амплитуда колебаний менее 1 мм) и при пилении на 20—30% меньше, чем при вращении пильного диска вхолостую. Обусловлено это тем, что в процессе пиления происходит гашение колебаний стенками пропила. Однако тесная связь между высотой пропила и амплитудой колебаний пилы не установлена.

Скорость резания существенно влияет на колебания пильного диска. При этом по мере роста скорости резания амплитуда колебаний уменьшается.

По данным результатов экспериментальных исследований нами получена следующая зависимость в развернутом виде между удельной работой резания и основными факторами, влияющими на ее величину:

$$K = (2,044 + 0,023 V - 0,0216 \Theta + \frac{ah}{b} + \frac{(0,2183 + 0,0101 \Theta)a_p}{e}), \quad (1)$$

где  $V$  — скорость резания, м/сек;

$h$  — высота пропила, мм;

$\Theta$  — кинематический угол встречи, град;

$a$  — интенсивность трения стружки о стенки пропила;

$b$  — ширина пропила, мм;

$e$  — толщина стружки, мм;

$a_p$  — коэффициент затупления.

Приняв в формуле (1)

$$2,044 + 0,023 V - 0,0216 \Theta = k, \quad (1a)$$

$$\frac{ah}{b} = k_{тр}, \quad (1б)$$

$$0,2183 + 0,0101 \Theta = p_3, \quad (1в)$$

получим следующее выражение удельной работы резания в общем виде:

$$K = k + k_{тр} + \frac{p_3 a_p}{e}, \quad (2)$$

где  $k$  — удельная работа трения опилок о переднюю грань зуба;

$k_{тр}$  — удельная работа трения опилок о стенки пропила;

$k + k_{тр}$  — удельная работа резания по передней грани зуба;

$\frac{P_3}{e}$  — удельная работа резания по задней грани зуба;

$P_3$  — удельная фиктивная сила, действующая по задней грани зуба.

Подставив в формуле  $N_p = \frac{k b h c z n}{102 \cdot 10^4 \cdot 6}$  вместо  $K$  его значение из формулы (1) и сделав соответствующие преобразования относительно  $c$ , получим:

а) для разведенных зубьев

$$c_p = \frac{102 \cdot N_p \cdot 6 \cdot 10^4}{h z n} - \frac{P_3 a_p s}{\sin \theta} \quad \text{мм}; \quad (3)$$

б) для плюшенных зубьев

$$c_{п} = \frac{102 \cdot N_p \cdot 6 \cdot 10^4}{k z n} - \frac{P_3 a_p b}{\sin \theta} \quad \text{мм}, \quad (4)$$

где  $N_p$  — мощность, расходуемая на резание, *квт*;

$n$  — число оборотов пильного вала, *мин*;

$z$  — число зубьев на пильном диске;

$s$  — толщина пильного диска, *мм*.

Значения остальных величин даны выше.

По данным наших исследований, для разведенных зубьев  $\alpha_p = 0,051$ . При плюшенных зубьях, по данным других исследователей,  $\alpha$  уменьшается на 15—20% и применительно к условиям наших опытов  $\alpha_{п} = 0,042$ .

Формула удельной работы резания (1) действительна для  $e \geq 0,1$  мм и круглых пил с разведенными и плюшеными зубьями при значениях  $c = 0,18—1,2$  мм;  $h = 80 \div 200$  мм;  $V = 25—70$  м/сек;  $\theta = 40—64^\circ$ ;  $\delta = 55^\circ$  и  $W \geq 30\%$  не только применительно к древесине сосны, но и других хвойных пород, так как влияние этих пород на силовые и технологические факторы практически считается одинаковым.

Базируясь на формуле (1) и вытекающих из нее формулах (3) и (4), нами разработан аналитический способ расчета режимов продольной распиловки влажной древесины на круглопильных станках [5]. Этот способ расчета прост, доступен широкому кругу работников лесной промышленности и позволяет в производственных условиях быстро и достаточно точно вычислить силовые, энергетические и технологические параметры круглопильных станков, а также их производительность. Для убедительности, наглядности и ознакомления с порядком расчетов приводим два примера.

**Пример 1.** Дано: круглопильный станок с механической подачей;  $D = 600$  мм;  $n = 1440$  об/мин; подъем стола над центром пильного вала  $a = 145$  мм; высота пропила  $h = 120$  мм; число зубьев  $z = 36$ , зубья разведенные; угол резания  $\delta = 55^\circ$ ; толщина пилы  $s = 2,20$  мм; ширина пропила  $b = 4,5$  мм; скорость подачи  $u = 20,8$  м/мин; порода — сосна влажностью  $W = 60\%$ ; зубья пилы острые, т. е. пила после заточки не работала.

Требуется определить: усилие резания  $P$  и подачи  $Q$ , полезную мощность  $N$ , расходуемую на резание и подачу, класс чистоты пропила  $\nabla\delta$ .

**Решение.** Чтобы определить эти величины, необходимо прежде всего найти угол встречи  $\theta$  и удельную работу  $K$ .

1. Определяем  $\theta$ . Наиболее просто это сделать по номограмме (рис. 1), предложенной проф. А. Л. Бершадским [1]. Для чего находим масштаб  $M$  перехода к  $D = 600$  мм (по условию диаметр пилы 600 мм), так как номограмма составлена для  $D = 100$  мм, и определяем значение

$$M \left( a + \frac{h}{2} \right):$$

$$M = \frac{100}{D} = \frac{100}{600} = \frac{1}{6} \quad \text{и} \quad M \left( a + \frac{h}{2} \right) = \frac{1}{6} \left( 145 + \frac{120}{2} \right) = 34,16 \text{ мм.}$$

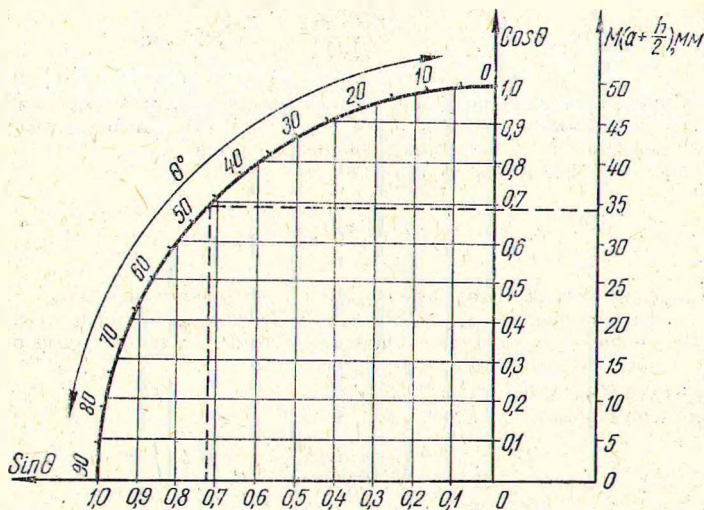


Рис. 1. Номограмма для определения угла встречи  $\theta$

Отложив на оси ординат 34,16 мм, проводим линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения с дугой и на шкале находим  $\theta = 46^\circ$ . По этой же номограмме на оси абсцисс находим  $\sin \theta = 0,72$ , а на оси ординат  $\cos \theta = 0,69$ .

2. Определяем  $K$  по полученной нами формуле (1). При заданных условиях

$$v = \frac{\pi D n}{60} = \frac{3,14 \cdot 0,6 \cdot 1440}{60} = 45,2 \text{ м/сек};$$

$$C = \frac{1000 U}{zn} = \frac{1000 \cdot 20,8}{36 \cdot 1440} = 0,4 \text{ мм.}$$

Так как зубья разведенные, то

$$e_p = \frac{b}{s} c \sin \theta = \frac{4,5}{2,20} \cdot 0,4 \cdot 0,72 = 0,576 \text{ мм.}$$

При плюсовых зубьях  $e_n = c \sin \theta$ . Зубья пилы острые и  $a_p = 1,0$ . Тогда

$$K = 2,044 + 0,023 \cdot 45,2 \cdot 2 \cdot 0,0216 \cdot 46 + \frac{0,051 \cdot 120}{4,5} + \frac{(0,2183 + 0,0101 \cdot 46)1,0}{0,576} =$$

$$= 4,64 \text{ кгм/см}^3.$$

3. Определяем силу резания  $P$  по формуле

$$P = kbh \frac{U}{V} = 4,64 \cdot 4,5 \cdot 120 \frac{20,8}{45,2 \cdot 60} = 19,3 \text{ кг.}$$

4. Определяем полезную мощность  $N_p$ , расходуемую на резание,

$$N_p = \frac{PV}{102} = \frac{19,3 \cdot 45,2}{102} = 8,52 \text{ квт.}$$

5. Определяем силу подачи  $Q$ . Из схемы сил, действующих на резец (рис. 2), усматриваем, что  $Q = P \cos \theta + R \sin \theta$  (5). Следовательно, для определения  $Q$  необходимо знать радиальную силу  $R$ .

Проф. А. Л. Бершадский установил, что

$$R = \frac{P_3}{f} - P_n \operatorname{tg} (90 - \delta - \varphi), \quad (6)$$

где  $P_3$  — фактическая сила, действующая по задней грани зуба;  
 $P_n$  — фактическая сила, действующая по передней грани зуба;  
 $f$  — коэффициент, учитывающий упруго-пластические деформации древесины и трение;  
 $\varphi$  — угол трения, равный 20—25°.  
 Согласно общему закону резания, имеем

$$P_3 = \frac{(a_p - 0,8) p_3}{Ke} P, \quad (7)$$

где  $p_3$  — фиктивная сила, действующая по задней грани зуба.  
 Из рис. 2 видно, что

$$P_n = P - P_3. \quad (8)$$

По данным наших исследований (см. формулу (1 в)),

$$P_3 = 0,2183 + 0,0101 \theta = 0,2182 + 0,0101 \cdot 46 = 0,683 \text{ кг.}$$

Тогда  $P_3 = (1 - 0,8) 0,683 \frac{19,3}{4,64 \cdot 0,576} = \frac{2,63}{2,67} = 0,98 \text{ кг}$ , а  $P_n = 19,3 - 0,98 = 18,32 \text{ кг}$ .

Коэффициент  $f$  зависит от  $a_p$  и, по данным проф. А. Л. Бершадского, имеет следующие значения (табл. 1):

Таблица 1

$a_p$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
$f$	2,0	1,5	1,25	1,1	1,0	0,9	0,8	0,75	0,7

Следовательно,  $R = \frac{0,98}{2} 18,32 \operatorname{tg} (90 - 55 - 25) = -2,73 \text{ кг}$ .

Знак минус говорит о том, что радиальная сила направлена по радиусу пильного диска к центру (при положительном значении она направлена от центра). В результате имеем

$$Q = 19,3 \cdot 0,694 + (-2,73) \cdot 0,719 = 11,43 \text{ кгГ.}$$

6. Определяем полезную мощность  $N_{\text{п}}$ , расходуемую на подачу:

$$N_{\text{п}} = \frac{QU}{102} = \frac{11,43 \cdot 20,8}{102 \cdot 60} = 0,034 \text{ квт.}$$

7. Определяем силу  $S$  (рис. 2), нормальную к силе  $Q$  и представляющую собой силу прижима распиливаемого материала к столу или отталкивания,

$$S = P \sin \theta - R \cos \theta, \quad (9)$$

$$S = 19,3 \cdot 0,719 - (-2,73 \cdot 0,694) = 13,88 + 1,89 = 15,77 \text{ кгГ.}$$

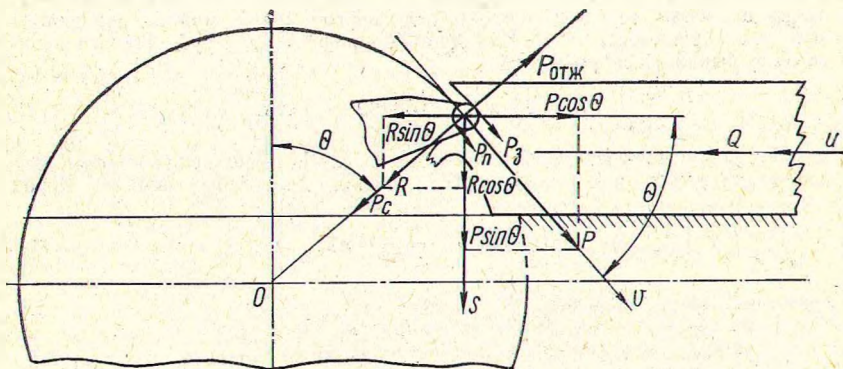


Рис. 2. Схема сил, действующих на резец круглой пилы при пилении

8. Определяем класс чистоты поверхности пиломатериалов  $\nabla d$ . Так как  $\nabla d = f(c, \theta)$ , то необходимо знать эту зависимость. По данным наших исследований, при остром резце примерные значения  $\nabla d$  для разведенных зубьев приведены в табл. 2.

Значения $c_p$ , мм	Значение углов встречи, град				
	40	46	52	58	64

Классы чистоты  $\nabla d$ 

0,20—0,45	5	5	5	4	4
0,45—0,70	5	4	4	4	4
0,70—0,95	4	4	3	3	3
0,95—1,20	3	3	3	2	2

В нашем примере  $\theta = 46^\circ$  и  $c = 0,4$  мм. Тогда по табл. 2 для этих условий имеем  $\nabla d$  5.

В процессе работы зубья пил затупляются и силовые и энергетические параметры будут возрастать. Чистота поверхности пиломатериалов при этом тоже ухудшится.

Действительно, допустим, что пыльный диск проработал два часа и зубья притуплены. Угол встречи  $\theta$ , подача на зуб  $c$ , толщина стружки  $e$  и скорость резания  $V$  остаются неизменными. Коэффициент затупления  $a_p$  будет другим. По формуле проф. А. Л. Бершадского [2], имеем

$$a_p = 1 + \frac{0,2 \Delta \rho_0}{\rho_0}, \quad (10)$$

где  $\rho_0$  — начальный радиус затупления;

$\Delta \rho_0$  — прирост начального радиуса затупления за время работы реза  $T$ .

У заточенного режущего инструмента начальный радиус затупления приблизительно 6—8 мк. Так как на  $\rho_0$  влияет угол заострения, то более точно значение  $\rho_0$  для каждого отдельного случая можно определить, зная его зависимость от  $\beta$ . По данным проф. А. Э. Грубе [3], эта зависимость выражается формулой

$$\rho_0 = 35 \text{ мк} - 0,55 (90 - \beta) \text{ мк}. \quad (11)$$

В порядке первого приближения проф. А. Л. Бершадский считает, что для стали 85ХФ при продольном пилении древесины хвойных пород

$$\Delta \rho_0 = 0,00000006 \frac{h}{\sin \theta} n T \eta_{p. д} \eta_{м. в}, \quad (12)$$

где  $n$  — число оборотов в минуту;

$T$  — время работы режущего инструмента, ч;

$\eta_{p. д}$  — коэффициент использования рабочего времени;

$\eta_{м. в}$  — коэффициент использования станочного времени.

По формулам (11) и (12) имеем:

$$\rho_0 = 35 - 0,55(90 - 40) = 35 - 27,5 = 7,5 \text{ мк};$$

$$\Delta \rho_0 = 0,00000006 \frac{120}{0,72} 1440 \cdot 2 \cdot 0,8 \cdot 0,9 = 0,021 \text{ мм} = 21 \text{ мк}.$$



$$\text{Тогда } a_p = 1 + \frac{0,2 \cdot 21}{7,5} = 1,0 + 0,54 = 1,54.$$

При  $a_p = 1,54$  по формуле (1) имеем

$$K = 5,25 \text{ кгм/см}^3.$$

Далее по тем же формулам, что и в первом примере, получим:

$$P = 21,86 \text{ кг}; N_p = 9,7 \text{ квт}; P_3 = 3,63 \text{ кг}; P_{II} = 18,30 \text{ кг};$$

$$R = 1,05 \text{ кг}; Q = 14,42 \text{ кг}; N_{II} = 0,049 \text{ квт}; S = 14,98 \text{ кг}.$$

Сопоставляя результаты расчетов, усматриваем рост энергетических и почти всех силовых параметров по мере затупления зубьев пилы. Сила  $P_{II}$ , действующая по передней грани зуба, осталась постоянной. Радиальная сила  $R$  в данном случае стала положительной величиной, что свидетельствует о том, что она направлена по радиусу пильного диска от центра и стремится приподнять распиливаемый материал. Сила  $S$  при этом уменьшилась.

На силовые, энергетические и технологические параметры также оказывает влияние и угол встречи  $\theta$ , зависящий от величины подъема стола над центром пильного вала и высоты пропила. Допустим, что подъем стола уменьшен и  $a = 95$  мм. Скорость резания и подачи при этом не изменятся, а угол встречи  $\theta$  и толщина стружки увеличатся и может измениться класс чистоты поверхности пиломатериалов.

Действительно, по номограмме (рис. 1) имеем:

$$\theta = 60^\circ; \sin \theta = 0,866; \cos \theta = 0,500.$$

Толщина стружки будет равной 0,692 мм и по формуле (1) при  $a_p = 1,0$  имеем

$$K = 4,34 \text{ кгм/см}^3.$$

В результате получим:

$$P = 17,96 \text{ кг}; N_p = 8,12 \text{ квт}; P_3 = 0,98 \text{ кг}; P_{II} = 16,98 \text{ кг}; R = - 2,50 \text{ кг}; \\ Q = 9,82 \text{ кг}; N_{II} = 0,023 \text{ квт}; S = 16,8 \text{ кг}; \text{ класс чистоты поверхности пиломатериалов } \gamma d4.$$

Сопоставляя эти данные, получаем некоторое уменьшение энергетических и силовых параметров, за исключением силы  $S$ , которая незначительно увеличилась. Класс чистоты стал ниже, т. е. поверхность пиломатериалов стала хуже.

Чтобы сохранить тот же класс чистоты, необходимо уменьшить подачу на зуб. Согласно данным табл. 2, она должна быть 0,2 мм. Но это приведет к резкому снижению производительности станка, что нежелательно.

**Пример 2.** Дано: круглопильный станок с механической подачей;  $N_{дв} = 14$  квт;  $D = 600$  мм;  $n = 1400$  об/мин; число зубьев  $z = 36$ ; зубья пилы разведенные, острые; угол резания  $\delta = 55^\circ$ ; толщина пилы  $s = 2,2$  мм; ширина пропила  $b = 4,5$  мм; высота пропила  $h = 160$  мм; подъем стола над центром пильного вала  $a = 120$  мм; порода древесины — сосна;  $W > 30\%$ .

Требуется определить, какая возможна подача на зуб и скорость подачи и какой при этом будет класс чистоты поверхности пиломатериалов.

**Решение.** Чтобы определить эти величины, необходимо сначала найти угол встречи  $\theta$  и  $\sin \theta$ .

1. Определяем угол встречи  $\theta$ . По номограмме (см. рис. 1) имеем  $\theta = 48^\circ$  и  $\sin \theta = 0,75$ .

2. Определяем подачу на зуб по формуле (3). Для чего вычисляем значения  $N_p$ ,  $V$ ,  $k$ ,  $p_3$ .

Мощность, расходуемая на резание  $N_p$ , будет меньше мощности двигателя на величину потерь в передаче и составит:

$$N_p = 14,0 \cdot 0,85 \approx 12 \text{ кВт};$$

$$V = \frac{3,14 \cdot 0,6 \cdot 14,00}{60} = 44,0 \text{ м/сек.}$$

По формулам (1а) и (1в) получим:

$$k = 2,044 + 0,023 \cdot 44,0 - 0,0216 \cdot 48 = 2,02 \text{ кгМ/см}^3;$$

$$p_3 = 0,2183 + 0,0101 \cdot 48 = 0,703 \text{ кгМ/мм.}$$

Зубья пилы острые и  $a_p = 1,0$ . Тогда

$$c_p = \frac{\frac{102 \cdot 12,0 \cdot 6 \cdot 10^4}{160 \cdot 36 \cdot 1400} - \frac{0,703 \cdot 1 \cdot 2,2}{0,75}}{2,02 \cdot 4,5 + 0,051 \cdot 160} = 0,408 \text{ мм.}$$

3. Определяем скорость подачи по формуле

$$U = \frac{c_p n}{1000} = \frac{0,408 \cdot 36 \cdot 1400}{1000} = 20,56 \text{ м/мин.}$$

4. Определяем класс чистоты пиломатериалов.

Известно, что  $\theta = 48^\circ$ , а  $c = 0,408$  мм. Тогда, согласно данным табл. 2, для этих условий имеем  $\nabla d 4$ .

Таким образом, максимальная допустимая скорость подачи в данном случае 20,6 м/мин, а класс чистоты поверхности пиломатериалов будет  $\nabla d 4$ .

Пользуясь вышеприведенными формулами (1), (3) и (4), можем анализировать влияние и других факторов на режимы продольного пиления древесины круглыми пилами. И так как в этих формулах обобщено большое количество факторов, то представляется возможным решить почти все вопросы, возникающие на производстве и при научных исследованиях.

## Литература

1. А. Л. Бершадский. Справочник по расчету режимов резания древесины. Гослесбумиздат, 1962.
2. А. Л. Бершадский. О расчете режимов продольного пиления. «Лесная промышленность», 1964, № 12.
3. А. Э. Грубе. Ставки и инструменты по деревообработке. Гослесбумиздат, 1949.
4. А. П. Матвейко. Перспективы развития лесопиления на круглопильных станках. В сб.: «Вопросы механизации лесозаготовок и транспорта леса». Минск, «Высшая школа», 1964.
5. А. П. Матвейко. Режим продольной распиловки древесины на круглопильных станках. «Лесная промышленность», 1965, № 8.