

**МИНОБРНАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФГБОУ ВО «УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Институт лесопромышленного бизнеса  
и дорожного строительства**

**Кафедра инновационных технологий  
и оборудования деревообработки**

**И.Т. Глебов**

## **Решение задач по резанию древесины**

Методические указания к практическим занятиям  
для студентов всех форм обучения  
направления 350302 «Технология лесозаготовительных  
и деревоперерабатывающих производств»  
по профилю «Технология деревообработки»

Екатеринбург 2017

Материал рассмотрен и рекомендован к изданию  
методической комиссией института ИЛБидС

Протокол № 8 от 15.02.2017 г.

Рецензент: канд. техн. наук, доцент,  
зав. кафедрой ИТОД

В.Г. Новоселов

## Введение

При изучении раздела «Резание древесины» модуля «Оборудование отрасли» учебным планом предусмотрено 12 аудиторных часов практических занятий, на которых развиваются навыки решения практических задач. Решаются такие задачи:

- определение рациональных посылок при пилении лесоматериалов рамными пилами;
- определение рациональных скоростей подач при пилении древесины круглыми пилами;
- определение рациональных скоростей подач при цилиндрическом фрезеровании древесины.

Расчеты выполняются по методу А.Л. Бершадского. Метод создан в 60-х годах прошлого столетия на базе общего закона резания древесины. В последние годы он несколько модернизирован автором, в нем используются поправочные коэффициенты, экспериментальные данные, аналитические зависимости, метод стал универсальным, пригодным для решения прямых и обратных задач, а также для системного анализа процесса резания. Метод А.Л. Бершадского пригоден для решения любых задач.

# 1. Пиление древесины рамными пилами

## 1.2. Справочные данные

**Уширение пропила.** Зубья рамных пил плющат или разводят. Величина уширения зубьев на сторону (табл. 1) зависит от породы распиливаемой древесины и ее температуры.

Таблица 1

Значения уширений зубьев  $S'$ , рекомендуемые для рамного пиления древесины ЗАО “Инструмент”

Диаметр сырья, см	Величина уширения зубьев, мм			
	Сосна, ель, влажностью свыше 30%		Лиственница	Ясень, бук, ильм и др. твердые породы
	зима	лето		
до 30	0,65 - 0,8	0,75 - 0,9	0,7 - 0,8	0,45 - 0,60
30-50	0,7 - 0,85	0,8 - 1,0	0,8 - 0,9	0,5 - 0,7
свыше 50	0,75 - 0,9	0,9 - 1,1	0,8 - 1,0	-

**Кинематика пиления на лесопильной раме.** При работе пильная рамка с пилами совершает возвратно-поступательное движение. Бревно надвигается на пилы вальцовым механизмом подачи. В лесопильной раме при движении пил вниз (рабочий ход) происходит пиление, а при движении пил вверх (холостой ход) пильная рамка возвращается в исходное положение.

Возвратно-поступательное движение пильной рамки с пилами (рис. 1) прямолинейно.

При выполнении расчетов часто пользуются средней скоростью главного движения, м/с:

$$V = Hn/30000, \quad (1)$$

где  $H$  – ход пильной рамки, мм;

$n$  – частота вращения кривошипа,  $\text{мин}^{-1}$ .

Скорость подачи, м/мин, находят по формуле

$$V_s = S_{2x}n/1000, \quad (2)$$

где  $S_{2x}$  – подача за двойной ход пил (посылка), мм. В современных лесопильных рамах посылка достигает 10...75 мм, а частота вращения коленчатого вала – 250...360 мин<sup>-1</sup>.

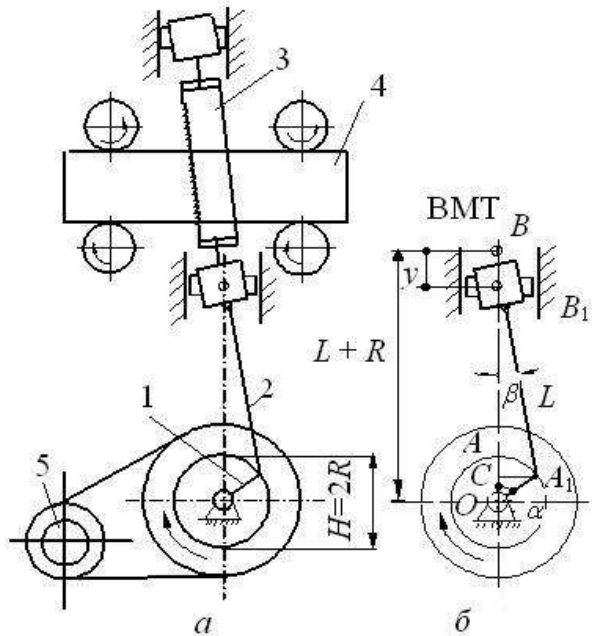


Рис. 1. Схема лесопильной рамы:  
*a* – кинематическая схема;  
*б* – кривошипно-шатунно-ползунный механизм

**Технические характеристики** современных лесопильных рам приведены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики двухэтажных лесопильных рам

Параметры	2P50-1	2P50-2	2P63-1	2P63-2
Ход пильной рамки, мм	700	700	700	700
Наибольший диаметр распил. бревна, см	28	-	38	-
Наибольшая толщина распил. бруса, мм	-	240	-	320
Число двойных ходов, мин <sup>-1</sup>	360	360	345	345
Посылка, мм	15...75	15...75	10...75	10...75
Общая установленная мощность, кВт	138	133	138	133

Продолжение табл. 2

Параметры	2P80-1	2P80-2	2P100-1	2P100-2
Ход пильной рамки, мм	700	700	700	700
Наибольший диаметр распил. бревна, см	52	-	70	-
Наибольшая толщина распил. бруса, мм	-	400	-	600
Число двойных ходов, мин <sup>1</sup>	320	320	250	250
Посылка, мм	10...70	10...70	4...40	4...40
Общая установленная мощность, кВт	138	138	168	168

Окончание табл. 2

Параметры	2P75-3	PK63	PT40	РПМ
Ход пильной рамки, мм	700	400	250	410
Наибольший диаметр распил. бревна, см	52	38	13	55
Просвет пильной рамки, мм	750	630	400	650
Число двойных ходов, мин <sup>1</sup>	320	285	480	210
Посылка, мм	10...80	4...40	2...6	1,6...24
Общая установленная мощность, кВт	179	52,4	41,6	30,5

**Справочные материалы.** При решении задач использованы действующие руководящие технические материалы РТМ и справочные данные, приведенные ниже.

Таблица 3

Зависимость сбега  $C_{\sigma}$  бревен от их диаметра:

Диаметр бревен в вершинном торце, см	До 26	28...36	38...44	46...54	56 и более
Сбег $C_{\sigma}$ , см/м	1,0	1,2	1,4	1,7	2,0

Таблица 4

Рекомендуемые шаги зубьев рамных пил

Способ распиловки	Диаметр бревен или высота брусьев, см	Шаг зубьев, мм
Распиловка бревен вразвал или с выпиливанием двух брусьев	До 22	26
	24...34	32
	36 и более	40
Распиловка бревен с брусовкой	До 30	26
	32...42	32
	44 и более	40
Развал брусьев	До 15	22
	16...22	26
	23...37	32
	38 и более	40

Таблица 5

Размеры сечения полотен, сила натяжения и свободная длина пил в зависимости от высоты пропила

Высота пропила, см	Диаметр бревен, см	Минимальные размеры полотен, мм		Сила натяжения, $F_n$ , кН	Свободная длина пил $l_c$ , мм, при ходе пил $H$ , мм		
		$S$	$B$		400	600	700
16...20	12...18	2; 2,2	80...90	40...50	700	900	1000
21...28	20...24	2; 2,2	80...100	40...50	800	1000	1100
29...36	26...30	2,2;2,5	80...110	50...60	950	1150	1250
37...44	32...38	2,2;2,5	100...130	50...60	1000	1250	1350
45...50	40...44	2,2;2,5	120...150	60...70	-	1350	1450
51...56	46...50	2,5	130...140	65...75	-	1500	1600
57...66	52...58	2,5;3,2	120...150	70...80	-	1550	1650
67 и более	60 и более	3,2	140...160	70...90	-	1550	1650

Примечание. Для пиления мерзлой древесины принимаются большие значения.

Таблица 6

Зависимость фиктивной силы резания  $p$  и касательного давления стружки  $k$  от породы древесины и ее температуры

Порода древесины	$p$ , Н/мм <sup>2</sup>	$k$ , МПа
Сосна, ель, пихта	$p = 7,2 + 0,11 t^\circ$	$k = 35,0 - 0,58 t^\circ$
Кедр, осина, ольха, липа	$p = 5,0 + 0,06 t^\circ$	$k = 24,0 - 0,4 t^\circ$
Лиственница, береза	$p = 8,5 + 0,115 t^\circ$	$k = 43,0 - 0,7 t^\circ$
Твердолиственные	$p = 12,0 + 0,16 t^\circ$	$k = 52,0 - 0,88 t^\circ$

Примечание. Для талой древесины  $t^\circ = 0^\circ\text{C}$ , для мерзлой –  $t^\circ = -5 \dots -19^\circ\text{C}$  (среднее  $-15^\circ\text{C}$ ) и  $t^\circ = -20 \dots -40^\circ\text{C}$  (среднее  $-30^\circ\text{C}$ ).

Таблица 7

Подача на зуб по шероховатости поверхности пиломатериалов

Шероховатость, $R_m$ , мкм	Максимальная подача на зуб $S_{z1}$ , мм, при шаге зубьев пил, мм			
	22		26,	32, 40
	$\Delta$	$\lambda$	$\Delta$	$\lambda$
700 ... 1100	1,7	1,2	1,8	1,25
До 1600	1,9	1,3	2,0	1,4

Примечание.  $\Delta$  – зубья плющенные;  $\lambda$  – зубья разведенные.

Таблица 8

Продолжительность работы рамных пил  $T$  и величина затупления режущих кромок зубьев пил на 1 м пути  $\gamma_\Delta$ , мкм/м, для хвойных пород древесины

Материал		$T$ , мин	$\gamma_\Delta$ , мкм/м
полотна пилы	зубьев		
9ХФ	9ХФ	150...210	0,002
9ХФ	Стеллит ВЗКР	420...480	0,000333
8Н1А	Стеллит ВЗКР	840...960	0,000333



Таблица 9

<b>Коэффициент на породу</b>	
сосна, ель, пихта	$m_n = 1,0;$
кедр, осина, ольха, липа	$m_n = 0,8;$
лиственница, береза	$m_n = 1,2;$
твердолиственные	$m_n = 1,25.$

Таблица 10

Расчетные формулы

Параметр	Формула
<b>Распиловка бревен диаметром <math>d</math>, см:</b>	
Максимальная высота пропила, мм	$t_{\max} = 10\sqrt{(d + 0,5L_{\bar{\sigma}}C_{\bar{\sigma}})^2 - m^2}$
Сумма высот пропилов при развале бревен, мм	$\sum t = 8,923 (d + 0,8)(i - 0,6)$
<b>Распиловка бревен с брусковкой:</b>	
Сумма высот пропилов, мм	$\sum t = [7,828 + 0,645\frac{t_{\bar{\sigma}}}{d} - 3,907(\frac{t_{\bar{\sigma}}}{d})^2](d + 0,1i + 0,4)i$
Средняя высота пропилов, мм	$t_{cp} = \sum \frac{t}{i}$
Свободная длина пил между прокладками, мм	$l_c = H + 10(d + L_{\bar{\sigma}}C_{\bar{\sigma}}) + 200$
<b>Развал брусьев</b>	
Максимальная высота пропила, мм	$t_{\max} = t_{\bar{\sigma}}$
Сумма высот пропилов, мм	$\sum t = [7,506(d + 5,5)(\frac{t_{\bar{\sigma}}}{d} + 0,15) - 25](i - 1) + 0,0714d^2 - 0,857d + 48,286$
Средняя высота пропилов, мм	$t_{cp} = \sum \frac{t}{i}$
Свободная длина пил между прокладками, мм	$l_c = H + 10t_{\bar{\sigma}} + 150$

<b>Общие формулы</b>	
Коэффициентом коррекции $K_3$ : $K_3 \geq 1$	$K_3 = \frac{1}{1,78 - 0,85t_{\max} / H}$
Удельное сопротивление трения опилок в пропиле, МПа:	$\alpha = m_y m_m (0,2 + 0,00012t_{cp}),$ для плющенных зубьев $m_y = 1,0$ ; для разведенных – $m_y = 1,25$ ;
Коэффициент состояния древесины поправочный	$m_m = 1 + 0,009t^o + 0,00025t^{o2}$
Критическая нормальная сила $F_{кр}$ , Н:	$F_{кр} = \pi^2 F_H \left[ \frac{B}{12} + \frac{GS^3}{3F_H} \right] / l_c,$ для стали $G = 8 \cdot 10^4$ МПа
Посылка с ограничением по шероховатости, мм	$S_{2x1} = S_{z1} H m_n m_c / t_3,$ для распиливаемой древесины 1-го и 2-го сортов $m_c = 1,1$ ; для 3-го сорта $m_c = 0,8$
Посылка с ограничением по заполнению впадин пилы опилками, мм	$S_{2x2} = \frac{\theta H t_3}{\sigma (t_{\max} - t_3) K_3},$ для талой древесины $\theta = 0,42$ ; мерзлой – $\theta = 0,42$ ; $\sigma = 0,83$
Величина затупления зубьев, мкм	$\Delta_\rho = \gamma_\Delta L = \gamma_\Delta t_{cp} n T K_u K_{px} / 1000,$ $K_u = 0,8 \dots 0,9$ ; $K_{px} = 0,5$
Коэффициент затупления режущих кромок зубьев	$\alpha_\rho = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta_\rho}{\rho_o + 50},$ $\rho_o = 10$ мкм
Посылка с ограничением по мощности, мм	$S_{2x3} = \frac{6 \cdot 10^7 P_{ycm} \eta}{n \sum t} \frac{\alpha_p p H b_l}{t_3},$ КПД при $H = 600$ мм $\eta = 0,8$ ; при $H = 700$ мм $\eta = 0,75$ ; при $H = 400$ мм $\eta = 0,7$

Посылка с ограничением по прочности полотен пил, мм	$S_{2x4} = S_{z4} H / t_3,$ $S_{z4} - \text{по табл. 12}$
Посылка с ограничением по устойчивости полотен пил, мм	$S_{2x5} = \frac{\left( \frac{0,8 F_{kp} t_3}{\alpha_{\rho} m_n b t_{\max}} + 0,75 t^0 - 40 \right) H}{(30 - 1,4 t^0) t_3}$
Ширина пропила, мм	$b = S + 2S'$
<p>Значения символов формул:</p> <p><math>d</math> – диаметр бревна в вершинном торце, см;</p> <p><math>C_6</math> – сбеги бревен, см/м;</p> <p><math>m</math> – расстояние между двумя средними пилами в поставе при четном числе пил (при нечетном числе пил, когда в поставе имеется центральная пил <math>m = 0</math>), см;</p> <p><math>i</math> – число пил в поставе;</p> <p><math>t_6</math> – толщина бруса, см;</p> <p><math>H</math> – ход пильной рамки, мм;</p> <p>10 – число для перевода размерности сантиметров в миллиметры.</p> <p><math>S</math> – толщина полотна пилы, мм;</p> <p><math>S'</math> – уширение зубьев на сторону, мм;</p> <p><math>t_3</math> – шаг зубьев пилы, мм;</p> <p><math>F_n</math> – сила натяжения пилы, <math>H</math> (см. табл. 7);</p> <p><math>B</math> – ширина пил, мм;</p> <p><math>G</math> – модуль упругости при кручении, для стали <math>G = 8 \cdot 10^4</math> МПа.</p> <p><math>L</math> – путь зуба пилы в древесине, м;</p> <p><math>t_{cp}</math> – средняя высота пропила, мм;</p> <p><math>n</math> – частота ходов пильной рамки, мин<sup>-1</sup>;</p> <p><math>T</math> – продолжительность работы пилы между переточками, мин;</p> <p><math>K_u, K_{px}</math> – коэффициенты использования (<math>K_u = 0,8 \dots 0,9</math>) и отношения продолжительности рабочего хода пил к продолжительности двойного хода пил (<math>K_{px} = 0,5</math>).</p> <p><math>k</math> – касательное давление срезаемого слоя на переднюю поверхность зуба, МПа;</p> <p><math>p</math> – фиктивная сила резания, Н/мм;</p> <p><math>\rho_o</math> – радиус закругления острого зуба, <math>\rho_o = 10</math> мкм.</p> <p><math>P_{уст}</math> – мощность электродвигателя механизма резания, кВт;</p>	

Таблица 11

Подача на зуб с ограничением по прочности полотен пил

Породы древесины	Выражения для $S_{z4}, \text{мм}$
Хвойные (кроме лиственницы), мягко-лиственные . . . . .	$S_{z4} = (2,4 + 0,023 t^{\circ}) m_y$
Береза . . . . .	$S_{z4} = (2,2 + 0,020 t^{\circ}) m_y$
Лиственница, твердолиственные . . .	$S_{z4} = (2,0 + 0,014 t^{\circ}) m_y$
Примечание. Для плющенных зубьев $m_y = 1$ ; для разведенных - $m_y = 0,7$ .	

**При раскросе бревен** на пиломатериалы часто применяют такие способы (рис. 2):

- развал бревна;
- распиловка с брусовкой на один или два бруса;
- развал бруса.

При распиловке бревен *вразвал* образуются необрезные доски и горбыли. Этот способ распиловки часто применяют при раскросе бревен лиственных пород.

При распиловке с *брусовкой* бревно распиливают за два прохода. На первом проходе из бревна получают один или два двухкантных бруса, необрезные доски и два горбыля.

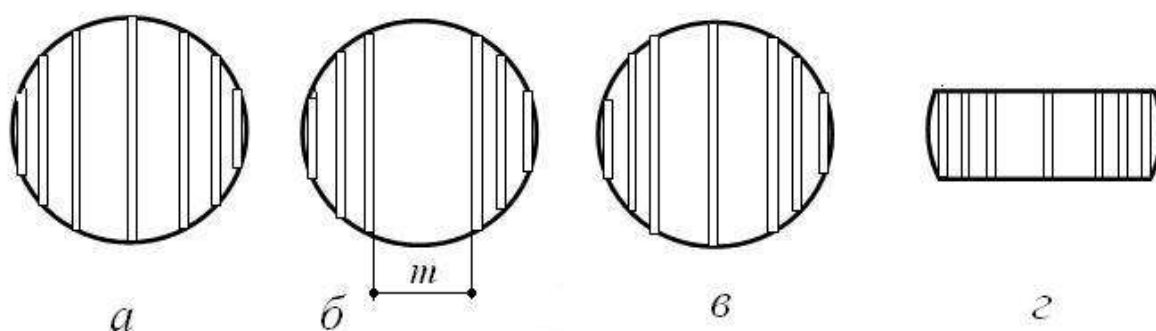


Рис. 2. Способы распиловки бревен:  
*a* – развал бревна; *б* – с брусовкой на один брус;  
*в* – с брусовкой на два бруса; *г* – развал бруса;

При развале бруса и получают обрезные доски шириною, равной толщине бруса, необрезные доски и два горбыля. При этом доски, выпиленные из средней части бруса, получают радиальными. Доски, выпиленные из периферийных зон бруса, получают тангентальными. Остальные доски занимают промежуточное положение.

### Пример.

**Дано.** На лесопильной раме 2Р50-1 с ходом пильной рамки  $H=700$  мм распиливаются в развал талые сосновые бревна диаметром  $d = 20; 22; 24$  см и влажностью  $W = 30\%$ . Мощность электродвигателя главного движения  $P_y = 130$  кВт. Длина бревен  $L_b = 6,5$  м. Частота вращения коленчатого вала  $n = 360$  мин<sup>-1</sup>, число пил в поставе  $i = 5; 6$ . Для пиломатериалов отборного, 1-го, 2-го, и 3-го сортов шероховатость распиленной поверхности  $R_{m \max} = 1250$  мкм. Для поставы с четным числом пил центральная доска имеет толщину  $m = 50$  мм. Рамные пилы выполнены из стали 9ХФ, зубья пилы оснащены стеллитом ВЗКР.

*Определить значения рациональных посылок и построить график посылок.*

**Решение.** 1. Выбираем размеры рамной пилы (табл. 4, 5): для распиловки бревен диаметром до 22 см  $t_3 = 26$  мм, при  $d = 24$  см  $t_3 = 32$  мм. Для всех пил  $S = 2$  мм,  $B_{\min} = 80$  мм, Сила натяжения пилы  $F_n = 40000$  Н, свободная длина пил  $L_c = 1100$  мм.

2. Выбираем величину сбег (табл. 3)  $C_b$  бревен по их диаметру:  $C_b = 1$  см/м.

3. Находим по табл. 10:

– максимальную высоту пропила  $t_{\max}$ , мм

$$t_{\max} = 10\sqrt{(d + 0,5L_b C_b)^2 - m^2} = 10\sqrt{(20 + 0,5 \cdot 6,5 \cdot 1)^2 - 0^2} = 232,5 \text{ мм};$$

– сумму высот пропилов  $\sum t$ , мм

$$\sum t = 8,923 (d + 0,8)(i - 0,6) = 8,923 (20 + 0,8)(5 - 0,6) = 816,6 \text{ мм};$$

– среднюю высоту пропила  $t_{\text{cp}}$ , мм

$$t_{\text{cp}} = \frac{\sum t}{i} = \frac{816,6}{5} = 163,3 \text{ мм};$$

– свободную длину пил между прокладками  $l_c$ , мм:

$$l_c = H + 10(d + L_{\bar{c}}C_{\bar{c}}) + 200 = 700 + 10(20 + 6,5 \cdot 1) + 200 = 1165 \text{ мм.}$$

Результаты расчетов сведены в табл. 12.

Таблица 12

Результаты расчетов

Наименование параметров	Обо- значе- ние	Раз- мер- ность	Кол. пил в поста- ве, шт	Диаметры бревен, см		
				20	22	24
Сбег бревен	$C_{\bar{c}}$	см/м	-	1	1	1
Максимальная высота пропи- ла	$t_{\max}$	мм	5	232,5	252,5	272,5
			6	227,0	247,8	267,8
Сумма высот пропила	$\sum t$	мм	5	816,6	895,1	973,7
			6	1002,2	1098,6	1195,0
Средняя высота пропила	$t_{\text{cp}}$	мм	5	163,3	179,0	194,0
			6	167,0	183,1	199,1
Свободная длина пил между прокладками	$l_c$	мм	-	1165	1185	1205
Коэффициент коррекции	$K_3$	-	5	1	1	1
			6	1	1	1
Удельное сопротивление тре- ния опилок в пропиле	$\alpha$	МПа	5	0,22	0,22	0,22
			6	0,22	0,22	0,22
Ширина пропила	$b$	мм	-	3,6	3,6	3,6
Нормальная критическая сила	$F_{kp}$	Н	-	4062,3	3993,8	3927,5
Посылка по шероховатости	$S_{2x1}$	мм	-	<b>53,3</b>	<b>53,3</b>	<b>43,3</b>
Посылка по производительности	$S_{2x2}$	мм	5	<b>44,6</b>	<b>40,7</b>	<b>47,1</b>
			6	45,7	41,6	48,1
Величина затупления зубьев	$\Delta_p$	мкм	5	3,7	4,1	4,4
			6	3,8	4,2	4,5
Коэффициент затупления	$\alpha_p$	-	5	1,09	1,1	1,1
			6	1,09	1,1	1,1
Посылка по мощности приво- да	$S_{2x3}$	мм	5	<b>118,2</b>	<b>105,2</b>	<b>95,3</b>
			6	<b>95,0</b>	<b>84,4</b>	<b>76,4</b>

Посылка по прочности пил	$S_{2x4}$	мм	-	64,6	64,6	52,5
Посылка по устойчивости пил	$S_{2x5}$	мм	5	47,2	38,7	38,8
			6	49,2	40,2	40,0
Рациональное значение посылки	$S_{2xp}$	мм	5	44,6	38,7	38,8
			6	45,7	40,2	40,0

4. Определяем коэффициент коррекции  $K_3$  (табл. 10):

$$K_3 = \frac{1}{1,78 - 0,85t_{\max} / H} = \frac{1}{1,78 - 0,85 \cdot 232,5 / 700} = 0,66.$$

Так как  $K_3 < 1$ , то принимаем  $K_3 = 1$ .

5. По табл. 6 определяем значения фиктивной силы резания  $p$  и касательного давления опилок на переднюю грань зуба  $k$ . Для талой древесины  $t^\circ = 0^\circ \text{C}$

$$p = 7,2 + 0,11 t^\circ = 7,2 + 0,11 \cdot 0 = 7,2 \text{ Н/мм};$$

$$k = 35,0 - 0,58 t^\circ = 35 \text{ МПа}.$$

6. Находим удельное сопротивление трения опилок в пропиле (табл. 10), МПа. Учитывая, что для плющенных зубьев  $m_y = 1,0$  и для талой древесины  $m_m = 1$ , получим

$$\alpha = m_y m_m (0,2 + 0,00012 t_{cp}) = 1 \cdot 1 (0,2 + 0,00012 \cdot 163,3) = 0,22 \text{ МПа}.$$

7. Определим значение ширины пропила  $b$  при уширении зубьев на сторону  $S' = 0,8$  мм (табл. 11):

$$b = S + 2S' = 2 + 2 \cdot 0,8 = 3,6 \text{ мм}.$$

8. Рассчитаем значение нормальной критической силы (табл. 10)

$$F_{кр} = \pi^2 F_H \left[ \frac{B}{12} + \frac{GS^3}{3F_H} \right] / l_c = 3,14^2 \cdot 40000 \left[ \frac{80}{12} + \frac{8 \cdot 10^4 \cdot 2^3}{3 \cdot 40000} \right] / 1165 = 4062,3 \text{ Н}.$$

9. Находим посылку  $S_{2x1}$  с ограничением по шероховатости поверхности пиломатериалов. При  $S_{z1} = 1,8$  мм (табл. 11), коэффициенте на породу древесины (табл. 9)  $m_n = 1$ , коэффициенте сортности для пиломатериалов 1-го и 2-го сорта  $m_c = 1,1$  (табл. 10) и шаге зубьев пилы  $t_3 = 32$  мм получим

$$S_{2x1} = S_{z1} H m_n m_c / t_3 = 1,8 \cdot 700 \cdot 1 \cdot 1,1 / 26 = 53,3 \text{ мм}.$$

10. Находим посылку  $S_{2x2}$  с ограничением по производительности (табл. 10). При коэффициенте формы зуба  $\theta = 0,42$  и коэффициенте напряженности междузубных впадин зубьев  $\sigma = 0,83$  получим

$$S_{2x2} = \frac{\theta H t_3}{\sigma(t_{\max} - t_3) K_3} = \frac{0,42 \cdot 700 \cdot 26}{0,83(232,5 - 26) \cdot 1} = 44,6 \text{ мм.}$$

11. Определим величину затупления зубьев к моменту отказа (табл. 10). Для выбранных пил с зубьями, оснащенными стеллитом, при  $\gamma_{\Delta} = 0,000333$  мкм/м (табл. 20),  $T = 420$  мин,  $K_u = 0,9$ ,  $K_{px} = 0,5$  получим

$$\Delta_{\rho} = \gamma_{\Delta} t_{cp} n T K_u K_n / 1000 = 0,000333 \cdot 163,3 \cdot 360 \cdot 420 \cdot 0,9 \cdot 0,5 / 1000 = 3,7 \text{ мкм.}$$

12. Коэффициент затупления режущих кромок зубьев пилы

$$\alpha_{\rho} = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta_{\rho}}{\rho_o + 50} = 1 + (1 + 0,1 \frac{35}{7,2}) \frac{3,7}{10 + 50} = 1,09.$$

13. Максимальная посылка  $S_{2x3}$ , ограниченная мощностью электродвигателя механизма главного движения

$$S_{2x3} = \frac{6 \cdot 10^7 P_{ycm} \eta}{n \sum t} \frac{\alpha_{\rho} p H b_l}{t_3} = \frac{6 \cdot 10^7 \cdot 130 \cdot 0,75}{360 \cdot 816,6} \frac{1,09 \cdot 7,2 \cdot 700 \cdot 3,6}{26} = 118,2 \text{ мм}$$

14. Найдем максимальную посылку  $S_{2x4}$ , ограниченную прочностью полотен и зубьев рамных пил. Для талой древесины сосны  $S_{Z4} = (2,4 + 0,023 t^{\circ}) m_y = 2,4$  мм, тогда

$$S_{2x4} = S_{Z4} H / t_3 = 2,4 \cdot 700 / 26 = 64,6 \text{ мм.}$$

15. Максимальная посылка  $S_{2x5}$ , ограниченная устойчивостью рамных пил:

$$S_{2x5} = \frac{(\frac{0,8 F_{kp} t_3}{\alpha_{\rho} m_n b t_{\max}} + 0,75 t^{\circ} - 40) H}{(30 - 1,4 t^{\circ}) t_3} = \frac{(\frac{0,8 \cdot 4062,3 \cdot 26}{1,09 \cdot 1 \cdot 3,6 \cdot 232,5} - 40) 700}{30 \cdot 26} = 47,2 \text{ мм.}$$

16. Выбираем рациональные посылки  $S_{2xp}$  для принятых в задаче условий. За рациональное значение посылки принимается минимальное из расчетных  $S_{Z1}$ ,  $S_{Z2}$ ,  $S_{Z3}$ ,  $S_{Z4}$ ,  $S_{Z5}$ .

Строим график посылок (рис. 3).



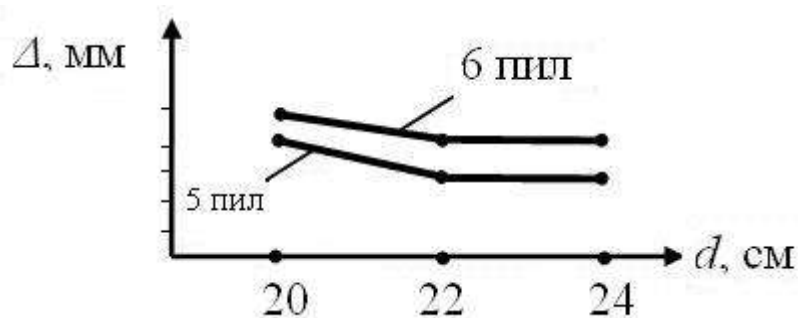


Рис. 3. График посылок

## 2. Пиление древесины круглыми пилами

### 2.1. Установка пил на валу

При установке пилы на шпиндель станка должны соблюдаться следующие условия.

Плоскость диска должна быть перпендикулярна оси вала. Для этого необходимо опорные плоскости пилы очистить от смолы и пыли, а торцовое биение коренного фланца отладить до значения, не превышающего 0,03 мм на радиусе 50 мм.

Ось вращения пилы должна совпадать с осью вала. Допустимое отклонение от соосности не более 0,1...0,2 мм.

**Допустимое торцовое и радиальное биение** зубьев плоских пил, установленных на вал станка, должно находиться в следующих границах:

Диаметр пилы D, мм	125...200	250...360	400...500	560...800	До 1500
Биение торцовое, мм	0,25	0,40	0,50	0,65	0,90
Биение радиальное, мм	0,20	0,30	0,40	0,60	1,00

Пила крепится на валу станка зажимными фланцами, которые должны взаимодействовать с пилой наружными ободками шириной 20...25 мм. В соответствии с ГОСТ 980-80 диаметр зажимных фланцев выбирают по диаметру пилы:

Диаметр пи- лы $D$ , мм	160...360	400...500	500...800	900...1000	1250	До 1500
Диаметр фланцев $D_{\phi}$ , мм	100	125	160	200	240	300

За пилой в ее плоскости на расстоянии 10...15 мм от вершин зубьев должен быть установлен расклинивающий нож. Толщина ножа равна или более на 0,2 мм ширины пропила.

Для пил диаметром более 500 мм устанавливают боковые направляющие, выполненные в виде штифтов из текстолита, фторопласта или других антифрикционных материалов. Зазор между пилой и направляющей принимается равным половине торцового биения плюс 0,1 мм.

## 2.2. Справочные данные

### 1. Выбор диаметра пилы:

– при работе периферийной зоной пилы

$$D_{\min} = 2(t + r_{\phi} + a_1 + a_2), \quad (3)$$

где  $t$  – высота пропила, мм;

$r_{\phi}$  – радиус зажимных фланцев, мм;

$a_1$  – зазор между зажимным фланцем и заготовкой, мм;

$a_2$  – выступ пилы из пропила, мм;

где  $h$  – расстояние от центра пилы до поверхности стола, мм;

$\delta$  – угол резания зубьев,  $\delta = \alpha + \beta$ .

### 2. Ширина пропила определяется по формуле

$$b = S + 2S', \quad (4)$$

где  $S$  – толщина диска, мм;

$S'$  – уширение зубьев на сторону, мм (табл. 13).

Таблица 13

Уширение зубьев круглых пил на сторону S'

Диаметр пил, мм	S', мм, при продольном и поперечном пилении древесины		
	хвойных пород влажностью W		твердых лиственных пород
	W ≤ 30% или древесина мерзлая	W > 30%	
125...315	0,40(0,20)	0,45 (0,30)	0,30 (0,20)
360...500	0,60 (0,30)	0,70 (0,40)	0,50 (0,30)
560...630	0,70 (0,40)	0,80 (0,50)	0,60 (0,40)
710...900	0,80 (0,50)	0,90 (0,60)	0,70 (0,50)
1000...1250	1,00 (0,70)	1,10 (0,80)	0,90 (0,60)
1500	1,20 (0,80)	1,30 (0,90)	1,10 (0,70)

Примечания: 1. Значения без скобок соответствуют продольной, в скобках – поперечной распиловке.  
 2. При продольной распиловке бревен и брусьев без охлаждения пил допускается увеличить уширение на 0,1...0,15 мм.  
 3. Пилы диаметром 1250...1500 мм шпалорезных станков, слешерных установок, раскряжевочных линий допускается подготавливать с уширением зубьев 1,5...2,0 мм.

**3. Скорости движений.** Скорость главного движения  $V$ , м/с:

$$V = \pi D n / 60000, \quad (5)$$

где  $D$  – диаметр пилы, мм;

$n$  – частота вращения пильного вала, мин<sup>-1</sup>.

Скорость подачи  $V_s$ , м/мин:

$$V_s = S_z z n / 1000, \quad (6)$$

где  $z$  – количество зубьев пилы;

$S_z$  – подача на зуб, мм.

Скорость результирующего движения  $V_e$ , м/с:

$$V_e = \sqrt{V^2 + V_s^2 + 2V V_s \cos \mu},$$

где  $\mu$  – угол подачи, град.

**4. Геометрия срезаемого слоя.** Границы контакта пилы с заготовкой можно выразить углом входа  $\varphi_{вх}$  зубьев в заготовку и углом выхода  $\varphi_{вых}$  (рис. 3, а, б). Расчетные формулы для определения этих углов приведены в табл. 13.

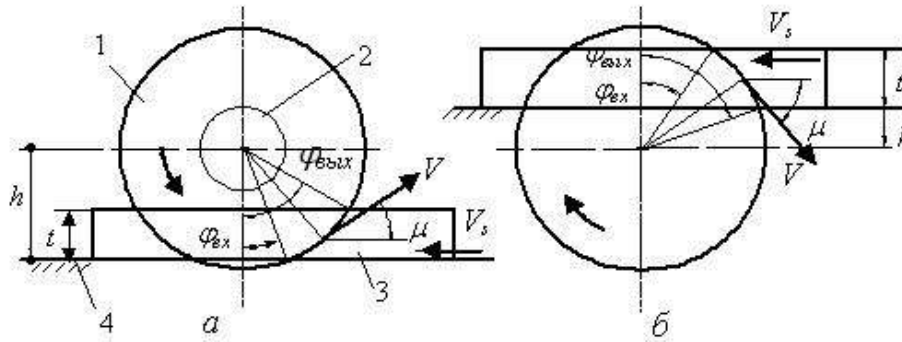


Рис. 4. Продольное пиление дисковой пилой:  
 а – с верхним расположением пилы; б – с нижним расположением пилы

Угол контакта зуба пилы с заготовкой  $\varphi_k = \varphi_{вых} - \varphi_{вх}$ .

Средний угол на дуге контакта  $\varphi_{ср}$ , равный углу подачи  $\mu$ :

$$\varphi_{ср} = \mu = (\varphi_{вх} + \varphi_{вых})/2. \quad (7)$$

Длина срезаемого слоя  $l$  вычисляется как длина дуги контакта. Выражая  $\varphi_k$  в радианах или в градусах, получим соответственно (табл. 14)

$$l = R\varphi_k \quad \text{или} \quad l = \pi D\varphi_k / 360^\circ. \quad (8)$$

Таблица 14

Значения углов  $\varphi_{вх}$  и  $\varphi_{вых}$  при встречной и попутной подачах

Положение пилы	Подача встречная		Подача попутная	
	$\varphi_{вх}$	$\varphi_{вых}$	$\varphi_{вх}$	$\varphi_{вых}$
Верхнее	$\arccos \frac{h}{R}$	$\arccos \frac{h-t}{R}$	$\arccos \frac{h-t}{R}$	$\arccos \frac{h}{R}$
Нижнее	$\arccos \frac{h+t}{R}$	$\arccos \frac{h}{R}$	$\arccos \frac{h}{R}$	$\arccos \frac{h+t}{R}$

Среднее значение толщины среза  $a_c$ , мм, на дуге контакта для плющенных и разведенных зубьев:

$$a_c = \frac{S_z b}{b_l (\varphi_{вых} - \varphi_{вх})} (\cos \varphi_{вх} - \cos \varphi_{вых}). \quad (9)$$

**Шероховатость.** Шероховатость (табл. 15) зависит от величины подачи на зуб и углов перерезания волокон древесины.

Таблица 15

Шероховатость поверхности пропила при различной подаче на зуб при продольном пилении древесины круглыми пилами [7, 8]

Высота неровностей, мкм	Максимальная подача на зуб, мм, при углах выхода зубьев из пропила, град					
	20	30	40	50	60	70
1200	1,8/1,2	1,8/1,2	1,8/1,2	1,8/1,2	1,5/1,2	1,5/1,2
800	1,5/1,0	1,5/1,0	1,5/1,0	1,5/1,0	1,2/0,8	1,2/0,8
500	1,2/0,8	1,2/0,8	1,2/0,8	1,2/0,8	0,75/0,5	0,75/0,5
320	0,45/0,3	0,45/0,3	0,45/0,3	0,45/0,3	0,15/0,10	0,15/0,10
200	0,15/0,10	0,15/0,10	0,15/0,10	0,15/0,10	0,15/0,10	0,15/0,10
100	0,15/0,10	0,15/0,10	0,15/0,10	0,15/0,10	–	–

Примечание: в числителе – для плющенных зубьев; в знаменателе – для разведенных зубьев; зубья пилы острые

**Изменение радиуса закругления режущих кромок** от пути зубьев пилы в заготовке приведено в табл. 16.

Таблица 16

Изменение радиуса закругления режущих кромок от пути зубьев пилы в заготовке  $L$ , м

Материал зуба пилы	Значение радиуса закругления, мкм	Примечание
Сталь 9ХФ	$\rho = 10 + 0,001L$	По А.Л. Бершадскому
ВК15	$\rho = 7,9107 + 0,0004L$	По А.И. Шевченко, УГЛТУ
ВК8	$\rho = 8,8613 + 0,0003L$	
ВК6	$\rho = 7,7107 + 0,0003L$	
ВК4	$\rho = 7,5929 + 0,0002L$	

Примечание. Данные по твердосплавному инструменту получены при режиме резания: пиление продольное; скорость главного движения  $V = 51,5$  м/с; подача на один зуб  $S_z = 0,2$  мм; угловые параметры зуба  $\gamma = 15^\circ$ ;  $\alpha = 18^\circ$ ; влажность древесины сосны  $W = 75 \dots 80$  %.

**Динамика продольного пиления.** Удельную силу резания при продольном пилении при  $a_c \geq 0,1$  мм определяют по формуле

$$F_{y\partial} = a_n a_w a_g \left[ \frac{\alpha \rho p}{a_c} + k + \frac{\alpha t}{b} \right], \quad (10)$$

где  $a_n$  – коэффициент учета породы древесины:

Порода	Липа	Осина	Ель	Сосна	Ольха
$a_n$	0,8	0,85	0,95	1,0	1,05
Порода	Лиственница	Береза	Бук	Дуб	Ясень
$a_n$	1,1	1,25	1,4	1,55	1,75

$a_w$  – коэффициент учета влажности:

Влажность, %	5...8	10...15	20...30	50...60	Более 70
$a_w$	1,1	1	0,93	0,89	0,87

$a_g$  – коэффициент вида пиления (встречное  $a_g = 1$ , попутное  $a_g = 1,1$ );

$\alpha_\rho$  – коэффициент затупления,

$$\alpha_\rho = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta_\rho}{\rho_o + 50}. \quad (11)$$

Фиктивная сила резания при пилении сосны  $p$ , Н/мм:

$$p_{//\perp} = 3,924 + 3,23 \sin^{1,25} \varphi_g; \quad (12)$$

Касательное давление стружки на переднюю поверхность зуба для продольно-торцового резания древесины сосны, МПа:

$$k_{//\perp} = 0,196\delta + 0,069V' - 5,4 + (0,354\delta + 0,127V' - 14,22) \sin^{1,25} \varphi_g, \quad (13)$$

где  $\varphi_g$  – угол встречи режущей кромки с волокнами, при продольном пилении принимают  $\varphi_g = \varphi_{cp} = \mu$ ;

$\delta$  – угол резания зуба, град;

$V'$  – условная скорость резания, м/с, причем если  $V < 50$  м/с, то  $V' = (90 - V)$ , иначе  $V' = V$ , где  $V$  – скорость главного движения.

Касательная сила резания при пилении одним зубом  $F_{x \text{ зуб}}$ , Н: для макрослоев ( $a \geq 0,1$  мм)

$$F_{x \text{ зуб}} = a_n a_w a_g \left[ \alpha_\rho p + \left( k + \frac{\alpha t}{b} \right) a_c \right] b_n, \quad (14)$$

для микрослоев ( $a \leq 0,1$  мм)

$$F_{x \text{ зуб } m} = a_n a_w a_g \left[ \alpha_\rho p + 0,1 \left( k + \frac{\alpha t}{b} \right) \right] \left( -\frac{1}{\lambda} a_c^2 + \frac{0,2}{\lambda} a_c + 1 - \frac{0,01}{\lambda} \right) b_n, \quad (15)$$

где  $\lambda$  – коэффициент:  $\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01$ ; здесь радиус закругления режущих кромок лезвий подставляется в мм;  $\rho = \rho_o + \Delta\rho$ .

В пропиле находится несколько зубьев, поэтому средняя касательная сила резания за оборот пилы (окружная сила резания) будет

$$F_x = F_{x \text{ зуб}} \frac{l}{t_3}. \quad (16)$$

Мощность пиления  $P$ , кВт:

$$P = \frac{F_x V}{1000}. \quad (17)$$

При решении обратных задач из формул находят значение средней толщины срезаемого слоя  $a_c$ . Обозначим в

$$m_1 = \frac{F_{x \text{ зуб}}}{a_n a_w a_e b_l d}, \quad (18)$$

где  $d = [\alpha_\rho p + 0,1(k + \frac{\alpha t}{b})]$ .

Если  $m_1 \geq 1$ , то расчет следует вести по формулам для макрослоев, при  $m_1 \leq 1$  расчет следует вести по формулам для микрослоев.

При срезании макрослоев ( $a_c \geq 0,1$  мм)

$$a_c = \frac{(\frac{F_{x \text{ зуб}}}{a_n a_w a_e b_l} - \alpha_\rho p) b}{(k b + \alpha t)}. \quad (19)$$

Выражение приводим к полному квадратному уравнению, после решения которого получим:

$$a_{cm} = 0,1 - \sqrt{\lambda(1-m)}, \quad (20)$$

где  $\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01$ ;  $\rho = \rho_o + \Delta_\rho$ ;  $\rho$  – в мм. При  $m_1 = 1$   $a_{cm} = 0,1$  мм.

Радиальная составляющая силы резания  $F_z$ , Н:  
при  $a_c \geq 0,1$  мм

$$F_z = [0,5\alpha_\rho^2(\alpha_\rho p + 0,1(k + \frac{\alpha t}{b})) \frac{\rho}{\rho + 50} - (a_c - 0,1)(k + \frac{\alpha t}{b}) \text{tg}(90^\circ - \delta - \varphi)] a_n a_w a_e b_l \frac{l}{t_3},$$

при  $a_c < 0,1$  мм

$$F_z = a_n a_w a_e b_l \frac{l}{t_3} 0,5\alpha_\rho^2 [\alpha_\rho p + 0,1(k + \frac{\alpha t}{b})] \frac{\rho}{\rho + 50}.$$

**Пример.** *Дано.* На круглопильном станке с нижним расположением пильного вала и механической подачей продольно распиливаются березовые доски толщиной  $t = 25; 32; 40; 50$  мм. Влажность досок  $W = 20\%$ .

Мощность электродвигателя механизма главного движения  $P = 4$  кВт, КПД привода  $\eta = 0,94$ , частота вращения пильного вала  $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ . Шероховатость распиленных поверхностей  $R_m = 320$  мкм. Угол резания зуба пилы  $\delta = 55^\circ$ . Расстояние от центра пилы до заготовки  $h = 90$  мм.

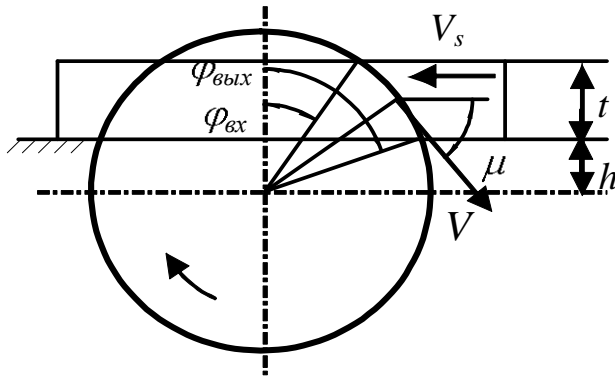


Рис. 5. Продольное пиление на станке с нижним расположением дисковой пилы

Требуется определить скорости подачи и построить график скоростей подачи.

*Решение.* Для наглядности решаемой задачи строится расчетная схема (рис. 5). Расчет выполняется в следующем порядке.

1. Из рис. 5 следует:

$$\begin{aligned} D &= 2(h + t + a_1) = \\ &= 2(90 + 50 + 20) = \\ &= 320 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Для работы выбираем пилу 3240-0226 по ГОСТ 980-80. С учетом переточки принимаем диаметр пилы  $D = 500$  мм. Толщина диска  $S = 2,5$  мм, число зубьев  $z = 48$  шт., передний угол лезвия  $\gamma = 35^\circ$ , зубья разведены, величина уширения зубьев  $S' = 0,5$  мм (табл. 13). Принимаем период стойкости  $T = 4$  ч или  $T = 240$  мин.

Окружной шаг зубьев

$$t_3 = \pi D / z = 3,14 \cdot 500 / 48 = 32,7 \text{ мм.}$$

2. Углы контакта (результаты расчетов сведены в табл. 14), рад.:

$$\varphi_{\text{вх}} = \arccos \frac{h + t}{R} = \arccos \frac{90 + 25}{250} = 1,09;$$

$$\varphi_{\text{вых}} = \arccos \frac{h}{R} = \arccos \frac{90}{250} = 1,2 \text{ рад.} = 68,9^\circ;$$

$$\varphi_k = \varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}} = 1,2 - 1,09 = 0,1097 \text{ рад.};$$

$$\varphi_{\text{ср}} = \mu = (\varphi_{\text{вх}} + \varphi_{\text{вых}}) / 2 = (1,09 + 1,2) / 2 = 1,1477 \text{ рад.}$$

Длина дуги контакта пилы с доской

$$l = \varphi_k D / 2 = 0,1097 \cdot 500 / 2 = 27,4 \text{ мм.}$$





4. Максимально допустимая подача на зуб  $S_{z1}$ , мм, ограниченная требованием к шероховатости распиленных поверхностей, находится по табл. 15. При  $\varphi_{\text{вых}} = 68,9^\circ$  и  $R_m = 320$  мкм  $S_{z1} = 0,15$  мм.

5. Максимально допустимая подача на зуб  $S_{z2}$ , мм, граничная вместимостью впадин зубьев:

$$S_{z2} = \theta t_3^2 / (\sigma t) = t_3^2 / (4 \dots 5),$$

где  $\theta$  – коэффициент формы зуба;

$\sigma$  – коэффициент напряженности впадины зуба ( $\sigma = 1$  для разведенных и  $\sigma = 0,8$  для плющенных зубьев).

$$S_{z2} = 32,7^2 / (5 \cdot 25) = 8,6 \text{ мм.}$$

6. Максимально допустимая подача на зуб  $S_{z3}$ , ограниченная мощностью привода.

6.1. Скорость главного движения

$$V = \pi D n / 60000 = 3,14 \cdot 500 \cdot 2500 / 60000 = 65,4 \text{ м/с.}$$

6.2. Фиктивная сила резания древесины сосны

$$p = 3,924 + 3,23 \sin^{1,25} \varphi_6 = 3,924 + 3,23 \sin^{1,25} 1,15 = 6,8 \text{ Н/мм.}$$

6.3. Касательное давление стружки на переднюю поверхность зуба

$$\begin{aligned} k_{//-\perp} &= 0,196\delta + 0,069V' - 5,4 + (0,354\delta + 0,127V' - 14,22) \sin^{1,25} \varphi_6 = \\ &= 0,196 \cdot 55 + 0,069 \cdot 65,4 - 5,4 + (0,354 \cdot 55 + 0,127 \cdot 65,4 - 14,22) \sin^{1,25} 1,15 = \\ &= 21,98 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

6.4. Величина затупления режущей кромки зуба

$$\Delta\rho = \gamma_{\Delta} \ln TK_n K_u / 1000 = 0,0013 \cdot 27,4 \cdot 2500 \cdot 240 \cdot 0,9 \cdot 0,9 / 1000 = 17,3 \text{ мкм.}$$

6.5. Коэффициент затупления при  $\rho_o = 10$  мкм

$$\alpha_{\rho} = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta_{\rho}}{\rho_o + 50} = 1 + (1 + 0,1 \frac{20,72}{6,25}) \frac{17,3}{10 + 50} = 1,38.$$

6.6. Касательная сила резания одним зубом

$$F_{x \text{ зуб}} = \frac{1000 P \eta t_3}{V l i} = \frac{1000 \cdot 4 \cdot 0,94 \cdot 32,7}{65,4 \cdot 27,4} = 68,5 \text{ Н.}$$

6.7. Коэффициенты

$$d = [\alpha_{\rho} p + 0,1(k + \frac{\alpha t}{b})] = [1,38 \cdot 6,80 + 0,1(21,98 + \frac{0,7 \cdot 25}{3,5})] = 12,1;$$

$$m_1 = \frac{F_{x \text{ зуб}}}{a_n a_w a_g b_l d} = \frac{68,5}{1,25 \cdot 0,93 \cdot 1 \cdot 2,5 \cdot 12,1} = 1,95;$$

для  $t = 50$  мм  $m = 0,76$ .

Если  $m_1 > 1$ , то толщина срезаемого слоя  $a_c$  определяется по формуле для макрослоев; при  $m_1 \leq 1 - a_{cm}$  – для микрослоев ( $a_{cm} \leq 0,1$  мм).

6.8. Средняя толщина срезаемого слоя для макрослоя

$$a_c = \frac{\left(\frac{F_{xзуб}}{a_n a_w a_g b_l} - \alpha_{\rho} \rho\right) b}{(kb + \alpha t)} = \frac{\left(\frac{68,5}{1,25 \cdot 0,93 \cdot 1 \cdot 2,5} - 1,38 \cdot 6,25\right) 3,5}{(20,72 \cdot 3,5 + 0,7 \cdot 25)} = 0,58 \text{ мм.}$$

Для  $t = 50$  мм  $a_c < 0,1$  мм. Выполним расчет по формулам:

$$\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01; \quad \rho = \rho_o + \Delta_{\rho}; \quad \rho - \text{в мм.}$$

$$\lambda = (0,010 + 0,035,7)^2 + 0,2(0,010 + 0,035,7) + 0,01 = 0,021;$$

$$a_{cm} = 0,1 - \sqrt{\lambda(1 - m)} = 0,1 - \sqrt{0,021(1 - 0,76)} = 0,028 \text{ мм;}$$

6.9. Подача на зуб  $S_{z3}$ , ограниченная мощностью привода мм:

$$S_{z3} = \frac{a_c l b_l}{t b} = \frac{0,53 \cdot 27,4 \cdot 2,5}{25 \cdot 3,5} = 0,41 \text{ мм.}$$

7. Скорости подач

Из трех значений подач на зуб для каждой высоты пропила выбирается минимальное расчетное значение  $S_{zp}$ :

Высота пропила $t$ , мм	25	32	40	50
$S_{zp}$ , мм	0,15	0,15	0,11	0,02

$$V_s = S_{zp} z n / 1000 = 0,15 \cdot 48 \cdot 2500 / 1000 = 18 \text{ м/мин.}$$

График скоростей подач приведен на рис. 6.

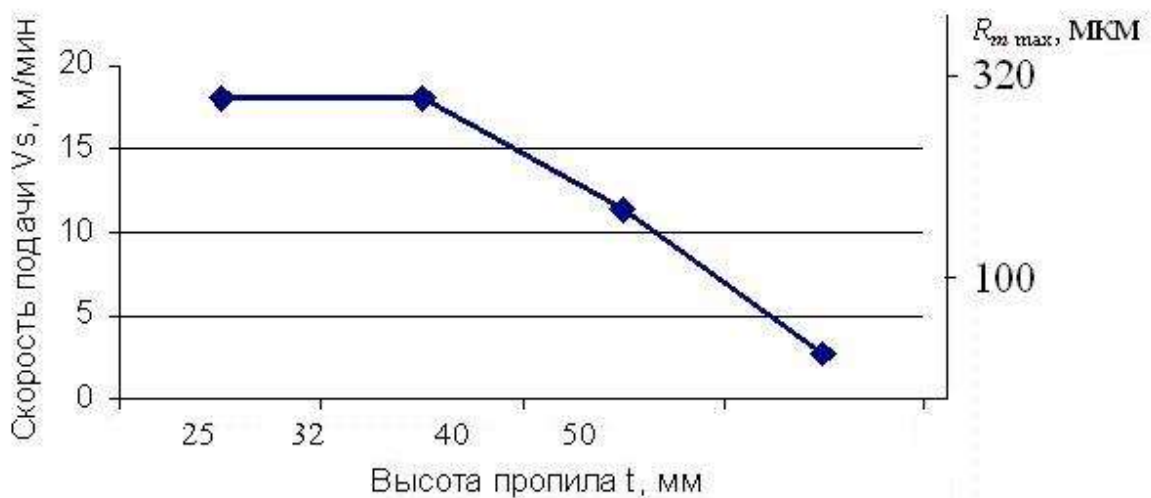


Рис. 6. График скоростей подач при пилении круглыми пилами

### 3. Цилиндрическое фрезерование древесины

#### 3.1. Справочные данные

Фрезерование древесины осуществляют цилиндрическими фрезами (цельными, сборными) и ножевыми валами.

Величина номинальных диаметров фрез соответствует нормализованному ряду 80, 100, 125, 140, 160, 180 мм. Диаметр посадочных отверстий принимается из ряда 22, 27, 32 и 40 мм. Угловые параметры зубьев приведены в табл. 18.

Предельно допустимая частота вращения фрез  $n$ , мин<sup>-1</sup>, зависит от их диаметра:

Диаметры фрез, мм . .	До 100	125	140	160	180
цельных	12000	10000	9000	8000	6200
сборных	12000	9000	8000	6200	5000

Период стойкости, ч, дереворежущих фрез зависит от материала лезвий и породы древесины:

Порода древесины:	хвойная	твердолиственная
Х6ВФ, 8Х6НФТ	2,0...2,7	1,0...1,5
8Х6ВМФ	3,0...4,0	1,8...2,7
Р6М5	3,4...4,6	2,0...3,0

Таблица 18

Угловые параметры фрез, град

Виды фрезерования	Передний $\gamma$ для фрез		Задний $\alpha$
	стальных	твердосплавных	
продольное	(20...25)/(10...15)	(20...30)/(10...25)	15/10
поперечное	(35...40)/(30...35)	30/30	10/10
торцовое	(30...35)/(25...30)	30/25	20/15
Фрезерование кромок ДСтП и ДВП	20...25	15...20	15...20

Примечание. В числителе - для хвойных пород, в знаменателе – для твердолиственных.

**Схема цилиндрического фрезерования**

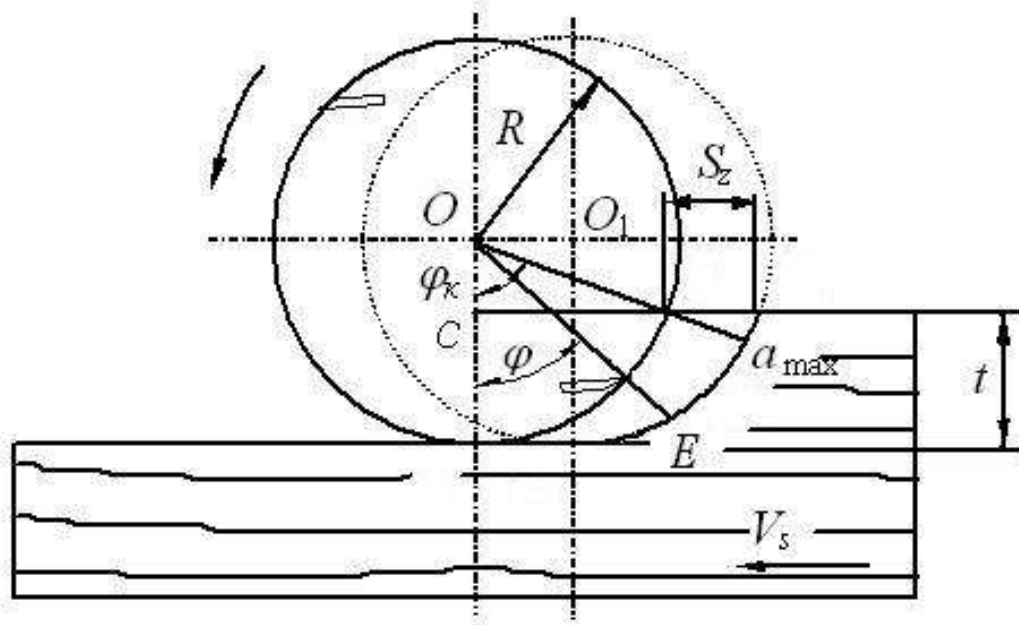


Рис. 7. Схема цилиндрического фрезерования

**Микронеровности поверхности.** При цилиндрическом фрезеровании основным видом неровностей обработанной поверхности является кинематическая волнистость. Высота гребешков волн  $y$  зависит от величины подачи на зуб  $S_z$  и погрешностей радиусов режущих кромок лезвий  $\Delta$  относительно максимального радиуса  $R$ . Эта зависимость описана уравнением:

$$S_z = \sqrt{y(2R - y)} + \sqrt{y(2R - y) - \Delta(2R - \Delta)}. \quad (21)$$

Отсюда можно сделать два вывода. *Во-первых*, неточность радиусов лезвий  $\Delta$  фрезы не должна превышать высоту гребней кинематических волн  $y$ . *Во-вторых*, значение подачи на зуб складывается из двух слагаемых. Первое из них равно половине максимального значения  $S_z$  при  $\Delta=0$ , а второе меньше первого с поправкой на погрешность длин радиусов  $\Delta$ .

В табл. 18 приведены значения подачи на зуб, полученные по формуле (42). Максимальное значение  $S_z$  получено при  $\Delta=0$ , минимальное – при  $\Delta = y$ , где  $y = R_{m \max}$ , мм.

Таблица 19

Предельные значения подачи на зуб  
при цилиндрическом фрезеровании древесины

Высота неровно- стей $R_{m \max}$ , мкм	Значения подачи на зуб $S_z$ , мм, при диаметре окружности резания $D$ , мм							
	60	80	100	120	140	160	180	200
6,3	0,6/1,2	0,7/1,4	0,8/1,6	0,9/1,7	0,9/1,9	1,0/2,0	1,1/2,1	1,1/2,2
12,5	0,9/1,7	1,1/2,0	1,2/2,2	1,3/2,4	1,4/2,6	1,5/2,8	1,6/3,0	1,7/3,2
25	1,3/2,4	1,5/2,8	1,7/3,2	1,8/3,5	2,0/3,7	2,1/4,0	2,3/4,2	2,4/4,5
50	1,7/3,5	2,1/4,0	2,3/4,5	2,6/4,9	2,8/5,3	3,0/5,7	3,1/6,0	3,3/6,3
100	2,4/4,9	2,8/5,7	3,2/6,3	3,5/6,9	3,9/7,5	4,1/8,0	4,4/8,5	4,6/8,9
200	3,7/6,9	4,3/8,0	4,8/8,9	5,2/9,8	5,7/10,6	6,1/11,3	6,4/12,0	6,8/12,6
400	5,1/9,8	5,9/11,3	6,6/12,6	7,3/13,8	7,8/14,9	7,4/16,0	8,9/17,0	9,4/17,9
800	6,9/13,8	8,2/15,9	9,2/17,8	10,1/19, 5	10,9/21, 1	11,7/22, 6	12,4/23, 9	13,1/25, 2

Примечания. 1. В числителе – значения  $S_z$  при  $\Delta=y$ ; в знаменателе – при  $\Delta=0$ .  
2. Неточность радиусов лезвий фрезы  $\Delta$  не должна превышать высоту не-  
ровностей  $R_{m \max}$ , мм (ГОСТ7016-82).

Допустимая погрешность радиусов лезвий находится по уравне-  
нию, мм

$$\Delta = R - \sqrt{R^2 + S_z^2 - 2S_z \sqrt{2Ry - y^2}}. \quad (22)$$

**Силы резания. Мощность на фрезерование.** Удельную силу  
резания при открытом продольном цилиндрическом фрезеровании  
определяют в зависимости от средней толщины срезаемого слоя для  
диапазона макрослоев и микрослоев по следующим формулам:

для макрослоев ( $a_c \geq 0,1$  мм)

$$F_{y\partial} = a_n a_w \left[ \frac{\alpha_\rho P}{a_c} + k \right], \quad (23)$$

где  $a_n$  – коэффициент, учитывающий породу древесины;

$a_w$  – коэффициент, учитывающий влажность;

$\alpha_\rho$  – коэффициент затупления [1]:

$$\alpha_\rho = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{P}) \frac{\Delta_\rho}{\rho_o + 50}, \quad (24)$$

где  $k$  – касательное давление стружки на переднюю поверхность лезвия при фрезеровании древесины сосны, МПа;

$p$  – фиктивная сила резания при фрезеровании сосны, Н/мм;

$\Delta_p$  – величина затупления режущей кромки, мкм;

$\rho_o$  – радиус закругления режущей кромки острого лезвия;  
 $\rho_o = 4 \dots 6$  мкм.

Фиктивная сила резания:

– при продольном фрезеровании древесины сосны  $p$ , Н/мм:

$$p_{//-\perp} = 1,57 + 3,23 \sin^{1,25} \varphi_e, \quad (25)$$

где  $\varphi_e$  – угол встречи;  $\varphi_e = \varphi_k/2$ .

– для продольно-торцово-поперечного резания

$$p_{\#-//} = 0,98 + 0,59 \cos^2 \varphi_c; \quad (26)$$

$$p_{//-\perp-\#} = p_{//-\perp} - (p_{//-\perp} - p_{\#-//}) \sin^{1,25} \varphi_H. \quad (27)$$

где  $\varphi_c$ ,  $\varphi_H$  – углы скоса и наклона соответственно.

Касательное давление стружки на переднюю поверхность зуба:

– для продольно-торцового резания древесины сосны, МПа:

$$k_{//-\perp} = 0,196\delta + 0,069V' - 5,4 + (0,354\delta + 0,127V' - 14,22) \sin^{1,25} \varphi_e, \quad (28)$$

– для продольно-торцово-поперечного резания

$$k_{\#-//} = 0,029\delta + CV' - 0,59 + (0,167\delta + (0,069 - C)V' - 4,81) \cos^2 \varphi_c; \quad (29)$$

$$k_{//-\perp-\#} = k_{//-\perp} - (k_{//-\perp} - k_{\#-//}) \sin^{1,25} \varphi_H. \quad (30)$$

где  $\delta$  – угол резания зуба, град;

$V'$  – условная скорость резания, м/с, причем если  $V < 50$  м/с, то  $V' = (90 - V)$ , иначе  $V' = V$ , где  $V$  – скорость главного движения.

Средняя касательная сила резания на дуге контакта при фрезеровании одним зубом  $F_{x \text{ зуб}}$ , Н:

$$F_{x \text{ зуб}} = F_{y\delta} a_c b, \quad (31)$$

где  $b$  – ширина срезаемого слоя, мм;

для макрослоев ( $a \geq 0,1$  мм)

$$F_{x \text{ зуб}} = a_n a_w [\alpha_p p + k a_c] b, \quad (32)$$

для микрослоев ( $a \leq 0,1$  мм)

$$F_{x \text{ зуб } m} = a_n a_w [\alpha_\rho \rho + 0,1k] \left( -\frac{1}{\lambda} a_c^2 + \frac{0,2}{\lambda} a_c + 1 - \frac{0,01}{\lambda} \right) b, \quad (33)$$

где  $\lambda$  – коэффициент:  $\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01$ ; здесь радиус закругления режущих кромок лезвий подставляется в мм;  $\rho = \rho_o + \Delta\rho$ .

Средняя касательная сила резания за оборот фрезы

$$F_x = F_{x \text{ зуб}} \frac{l}{t_3}, \quad (34)$$

где  $l$  – длина дуги контакта, мм;

$t_3$  – шаг зубьев фрезы, мм;  $t_3 = \frac{\pi D}{z}$ , где  $D$  – диаметр окружности резания фрезы, мм;  $z$  – количество зубьев фрезы.

Мощность фрезерования  $P$ , кВт:

$$P = \frac{F_x V}{1000}.$$

### 3.2. Пример

**Дано.** Проектируется новый рейсмусовый станок для обработки заготовок из древесины сосны шириною  $b = 100$  мм и влажностью  $W = 10\%$ . Диаметр окружности резания ножевого вала  $D = 128$  мм, частота вращения вала  $n = 5000$  мин<sup>-1</sup>, число ножей  $z = 4$ , угол резания ножей  $\delta = 65^\circ$ . Период стойкости ножей  $T = 240$  мин, шероховатость обработанной поверхности  $R_m = 100$  мкм, глубина фрезерования  $t = (2; 4; 5; 6)$  мм. Ширина стола  $b_c = 630$  мм.

Конструктивная скорость подачи  $V_{sk} \leq 36$  м/мин.

С учетом аналогов принята мощность электродвигателя механизма главного движения  $P = 7$  кВт, КПД передачи  $\eta = 0,94$ .

*Определить* скорости подач и построить график скоростей подач.

*Решение.* 1. Скорость главного движения

$$V = \pi D n / 60000 = 3,14 \cdot 128 \cdot 5000 / 60000 = 33,51 \text{ м/с.}$$

2. Угол контакта режущей кромки с заготовкой для  $t = (2; 4; 5; 6)$  мм:

$$\varphi_k = 115 \sqrt{t/D} = 115 \sqrt{2/128} = 14,375^\circ.$$

Результаты расчетов представлены в табл. 20 и на рис. 8.

3. Длина дуги контакта  $l_k = \sqrt{tD} = \sqrt{2 \cdot 128} = 16,0$  мм.



4. Подача на зуб с ограничением по шероховатости. По табл. 19 для  $R_{m \max} = 0,1$  мм и точности радиусов лезвий  $\Delta \leq 0,1$  мм  $S_z = 3,5$  мм.

5. Прирост затупления лезвий за время работы

$$\Delta_p = \gamma_{\Delta} l_k n T K_n K_u / 1000 = 0,0008 \cdot 16,0 \cdot 5000 \cdot 240 \cdot 0,9 \cdot 0,9 / 1000 = 12,02 \text{ мкм.}$$

Таблица 20

Результаты расчетов

Параметры	Обозначение	Размерность	Глубина фрезерования $t$ , мм			
			2	4	5	6
Скорость резания	$V$	м/с	33,51	33,51	33,51	33,51
Угол контакта	$\varphi_k$	град	14,38	20,33	22,73	24,90
Длина дуги контакта	$l_k$	мм	16,0	22,6	25,3	27,7
Подача на зуб по шероховатости	$S_{z1}$	мм	<b>3,5</b>	<b>3,5</b>	<b>3,5</b>	<b>3,5</b>
Прирост затупления	$\Delta_p$	мкм	12,03	17,01	19,02	20,83
Фиктивная сила резания	$p$	Н/мм	1,80	1,92	1,97	2,0
Касательное давление	$k$	МПа	12,4	13,2	13,4	13,6
Коэффициент затупления	$\alpha_p$	–	1,37	1,52	1,58	1,64
Окружная сила резания	$F_{xo}$	Н	196,4	196,4	196,4	196,4
Средняя сила резания на дуге контакта	$F_{хзуб}$	Н	1233,8	872,4	780,3	712,3
Средняя толщина среза при						
$b = 100$ мм	$a_c$	мм	0,78	0,44	0,35	0,28
$b = 200$ мм	$a_c$	мм	0,29	0,11	0,06	0,04
$b = 300$ мм	$a_c$	мм	0,13	0,03	0,02	0,01
Подача на зуб по мощности при						
$b = 100$ мм	$S_{z2}$	мм	<b>1,8</b>	<b>1,8</b>	<b>1,77</b>	<b>1,31</b>
$b = 200$ мм	$S_{z2}$	мм	<b>1,8</b>	<b>0,62</b>	<b>0,29</b>	<b>0,18</b>
$b = 300$ мм	$S_{z2}$	мм	<b>1,03</b>	<b>0,18</b>	<b>0,10</b>	<b>0,06</b>
Расчетная подача на зуб (принимается минимальное значение)						

$b = 100$ мм	$S_{zp}$	мм	1,80	1,80	1,77	1,31
$b = 200$ мм	$S_{zp}$	мм	1,80	0,62	0,29	0,18
$b = 300$ мм	$S_{zp}$	мм	1,03	0,18	0,10	0,06
Скорость подачи при						
$b = 100$ мм	$V_s$	м/ми Н	36,0	36,0	35,4	26,2
$b = 200$ мм	$V_s$	м/ми Н	36,0	12,4	5,8	3,6
$b = 300$ мм	$V_s$	м/ми Н	20,6	3,6	2,0	1,1

6. Фиктивная сила резания

$$p_{//-\perp} = 1,57 + 3,23 \sin^{1,25} \varphi_g = 1,57 + 3,23 \sin^{1,25} 7,2^\circ = 1,8 \text{ Н/мм.}$$

7. Касательное давление стружки на переднюю грань

$$\begin{aligned} k_{//-\perp} &= 0,196\delta + 0,069V' - 5,4 + (0,354\delta + 0,127V' - 14,22) \sin^{1,25} \varphi_g = \\ &= 0,196 \cdot 65 + 0,069(90 - 33,51) - 5,4 + (0,354 \cdot 65 + 0,127(90 - 33,51) - \\ &- 14,22) \sin^{1,25} 7,2^\circ = 12,43 \text{ МПа} \end{aligned}$$

8. Коэффициент затупления

$$\alpha_\rho = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta_\rho}{\rho_o + 50} = 1 + (1 + 0,1 \frac{12,43}{1,8}) \frac{12,03}{5 + 50} = 1,37.$$

9. Окружная касательная сила резания

$$F_{xo} = 1000P\eta/V = 1000 \cdot 7 \cdot 0,94 / 33,51 = 196,4 \text{ Н.}$$

10. Средняя сила резания на дуге контакта

$$F_{хзуб} = F_{xo} \pi D / (l_k z) = 196,4 \cdot 3,14 \cdot 128 / (16 \cdot 4) = 1233,8 \text{ Н.}$$

11. Средняя толщина срезаемого слоя при подаче по одной заготовке ( $b = 100$  мм).

Коэффициенты

$$\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01; \rho = \rho_o + \Delta_\rho; \rho - \text{в мм.}$$

$$\lambda = (0,005 + 0,0123)^2 + 0,2(0,005 + 0,0123) + 0,01 = 0,01369;$$

$$F_{x0,1} = \alpha_\rho p + 0,1k = 1,37 \cdot 1,8 + 0,1 \cdot 12,43 = 3,75 \text{ Н/мм;}$$

$$m_1 = \frac{F_{x \text{ зуб}}}{a_n a_w b F_{x0,1}} = \frac{1233,8}{1 \cdot 1 \cdot 100 \cdot 3,75} = 3,3.$$

Так как  $m_1 > 1$ , то толщина срезаемого слоя  $a_c$  определяется по формуле для макрослоев

$$a_c = \frac{\frac{F_{x \text{ зуб}}}{a_n a_w b} - \alpha_{\rho} P}{k} = \frac{\frac{1233,8}{1 \cdot 1 \cdot 100} - 1,37 \cdot 1,8}{12,43} = 0,78 \text{ мм.}$$

При срезании микрослоев толщина срезаемого слоя находится по формуле (для  $b = 200$  мм и  $t = 6$  мм)

$$a_{cm} = 0,1 - \sqrt{\lambda(1 - m_1)} = 0,1 - \sqrt{0,0158(1 - 0,77)} = 0,04 \text{ мм.}$$

12. Подача на зуб, ограниченная мощностью привода:

$$S_{z2} = a_c / \sqrt{t/D} = 0,78 / \sqrt{2/128} = 6,25 \text{ мм.}$$

За расчетную подачу на зуб принимается наименьшее значение из подач с ограничениями по шероховатости и мощности привода.

13. Скорость подачи

$$V_s = S_{zp} z n / 1000 = 6,25 \cdot 4 \cdot 5000 / 1000 = 36,5 \text{ м/мин.}$$

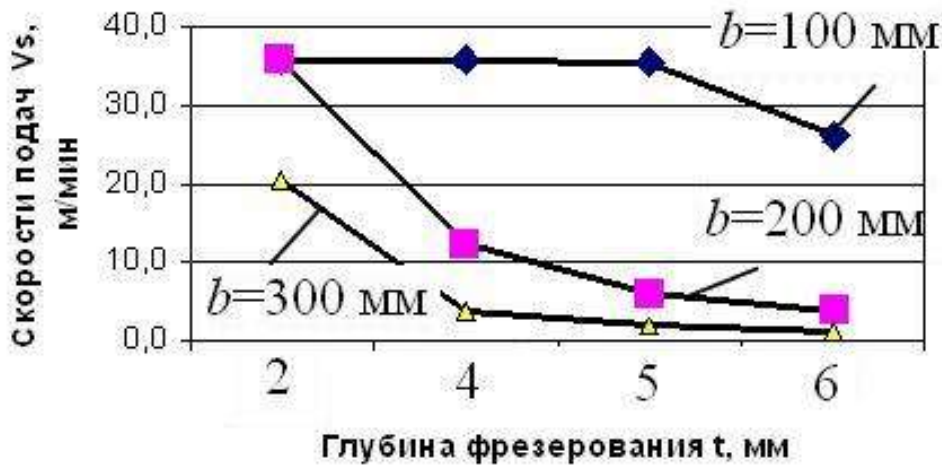


Рис. 8. График скоростей подачи продольно-фрезерного рейсмусового станка

## Оглавление

Введение .....	3
1. Пиление древесины рамными пилами .....	4
2. Пиление древесины круглыми пилами .....	17
3. Цилиндрическое фрезерование древесины .....	28