

Ю. М. КОМАРОВ,
кандидат технических наук, доцент

МЕХАНИЧЕСКОЕ ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ ДРЕВЕСИНЫ ЗУБЦАМ ЦЕПНЫХ ПИЛ ПРИ ПИЛЕНИИ

Практика эксплуатации электропил показывает, что для повышения производительности их и уменьшения расхода энергии необходимо усовершенствовать режущие свойства цепных цепей. Это возможно лишь на основе детально разработанной теории процесса поперечного пиления.

В ряде работ были установлены закономерности изменения скорости резания от наиболее важных факторов, действующих в процессе пиления и даны эмпирические формулы, выражающие связь этих факторов с усилием резания и подачи. Результаты этих работ способствовали улучшению конструкции режущих цепей, но в них отсутствовал анализ явлений, происходящих в процессе пиления. Мало изучены физические явления процесса противодействия древесины режущим элементам, знание которых позволит улучшить режущие свойства пильных цепей, вскрыть новые резервы увеличения комплексной производительности труда на лесоразработках.

Сопротивление движению режущего инструмента, возникающее в узком полузамкнутом пространстве пропила, складывается из нормальных и касательных сил, действующих на соприкасающихся поверхностях. Работа, затрачиваемая на преодоление сил трения, в общем энергетическом балансе процесса пиления составляет значительную часть. Силы трения достигают иногда больших величин и затрудняют образование пропила, ведут к перегреву режущих элементов, интенсифицируют износ и затупление зубцов, уменьшая их режущую способность. Отсутствие исследований о величине и характере изменения третьей—боковой составляющей равнодействующей силы противодействия древесины зубцам затрудняет изучение сил трения и нормальных давлений на гранях зубцов. В данной статье рассматриваются зависимости трех составляющих усилий от некоторых факторов пиления. Сила трения будет посвящена специальная статья.

РАВНОВЕСИЕ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА РЕЖУЩИЙ И СКАЛЫВАЮЩИЙ ЗУБЦЫ

Равнодействующая сила противодействия древесины режущему зубцу P при проектировании на три взаимно перпендикулярных направления дает три составляющие усилия: горизонтальную—усилие резания P_x , вертикальную—усилие подачи P_z и поперечную—усилие отжима зубца в сторону P_y . Эти составляющие имеют непосредственную связь с истинными силами, которые могут быть определены условиями равновесия зубцов в момент стружкообразования. Когда зубец вошел в древесину под влиянием силы P и вызвал противодействие сил N_{II} , N_3 и N_6 , нормальных к граням зубца и приложенных в некоторых точках 1, 2 и 3 (рис. 1), появляются соответствующие им силы трения $\mu_1 N_{II}$, $\mu_2 N_3$ и $\mu_3 N_6$. Сумма проекции всех нормальных и касательных сил на три взаимно перпендикулярных направления равна соответственно трем составляющим усилиям равнодействующей силы P .

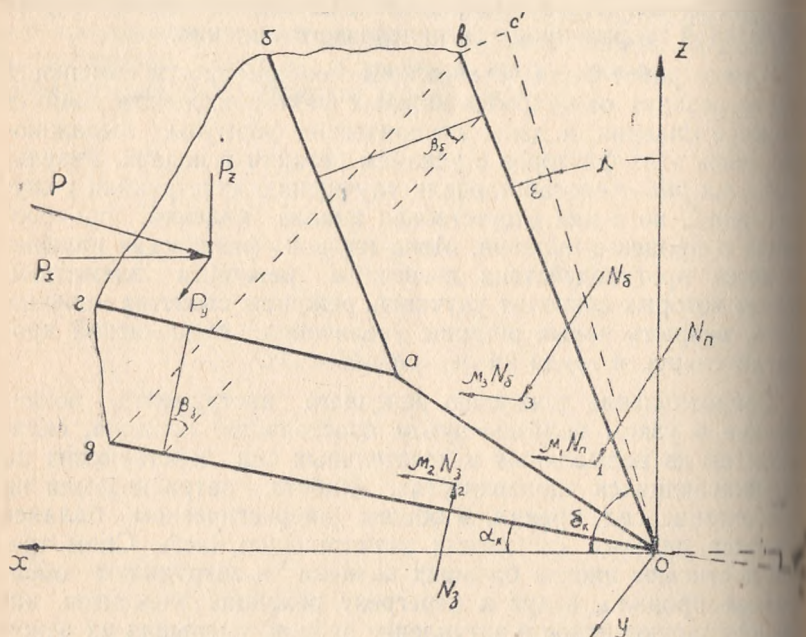


Рис. 1

В результате анализа силового противодействия древесины внедрению зубцов при пилении найдены две системы уравнений равновесия сил. Первая система для режущего зубца состоит из трех уравнений и вторая для скалывающего зубца

из двух уравнений. Для общего случая пиления уравнения представляются в следующем виде:

а) для режущего зубца:

$$P_x = N_n (\sin \beta_6 \sin \delta_k + \mu_1 \cos \delta_6 \cos \varphi) - N_3 \sin (\beta_3 - \Sigma) + \mu_2 N_6 \cos \varphi, \quad (1)$$

$$P_y = N_n (\mu_1 \sin \varphi \cos \delta_6 - \sin \beta_6 \cos \delta_k) + N_3 [\cos \alpha_k \sin (\beta_3 + \Sigma) + \mu_2 \sin \alpha_k] - N_6 (\sin \Sigma - \mu_3 \sin \varphi), \quad (2)$$

$$P_y = N_n (\mu_1 \sin \delta_6 \cos \varphi - \sin \delta_k \cos \beta_6) - N_3 \cos \alpha_k \cos (\beta_3 + \Sigma) + N_6 \cos \Sigma, \quad (3)$$

где:

N_n — равнодействующая нормальных сил на передней грани;

N_3 — равнодействующая нормальных сил на задней грани;

N_6 — равнодействующая нормальных сил на боковой поверхности зубца;

μ_1 — коэффициент трения между передней гранью и сжимаемым слоем древесины;

μ_2 — коэффициент трения между задней гранью и дном пропила;

μ_3 — коэффициент трения между боковой поверхностью активной части режущего зубца и стенкой пропила;

δ_6 — угол резания боковой режущей кромки режущего зубца;

δ_k — угол резания короткой кромки;

α_k — задний угол короткой кромки;

β_6 — угол заточки передней грани режущего зубца;

β_3 — угол скоса задней грани режущего зубца;

Σ — угол развода зубцов;

φ — угол движения;

б) для скалывающего зубца:

$$P_x' = N_n' (\sin \delta_k' - \mu_1' \cos \delta_k') + N_3' (\sin \alpha_k' + \mu_2' \cos \alpha_k'), \quad (4)$$

$$P_y' = N_n' (\mu_1' \sin \delta_k' - \cos \delta_k') + N_3' (\cos \alpha_k' + \mu_2' \sin \alpha_k'), \quad (5)$$

$$P_y = 0,$$

где:

P_x' — горизонтальная составляющая равнодействующей силы противодействия древесины внедрению скалывающего зубца;

P_y' — вертикальная составляющая;

N_n' — равнодействующая нормальных сил на передней грани;

N_3' — равнодействующая нормальных сил на задней грани;

μ_1' — коэффициент трения между передней гранью и стружкой;

μ_2' — коэффициент трения между задней гранью и древесиной дна пропила;

δ_{κ}' — угол резания короткой кромки скалывающего зубца
 α_{κ}' — задний угол короткой кромки.

Аналитическое решение полученных уравнений в их общем виде (для раскрытия закономерностей изменения истинных сил) при переменных угловых параметрах не представляется возможным. Для частного случая при заданных (оптимальных) угловых параметрах зубцов эти уравнения имеют вид:

$$P_x = (0,77 + 0,56 \mu_1) N_n + (0,98 \mu_2 - 0,18) N_3 + \mu_3 N_6, \quad (6)$$

$$P_z = (0,90 + 0,19 \mu_2) N_3 - 0,36 N_n - 0,16 N_6, \quad (7)$$

$$P_y = (0,83 \mu_1 - 0,48) N_n - 0,38 N_3 + 0,98 N_6, \quad (8)$$

$$P_x' = (0,98 + 0,18 \mu_1') N_n' + (0,98 \mu_2' - 0,16) N_3', \quad (9)$$

$$P_z' = (0,98 \mu_1' - 0,17) N_n' + (0,98 + 0,16 \mu_2') N_3', \quad (10)$$

При этом были приняты следующие угловые параметры, входящие в уравнения 1—5: $\delta_{\kappa} = 65^\circ$, $\beta_6 = 58^\circ$, $\beta_3 = 38^\circ$, $\alpha_{\kappa} = 10^\circ$, $\Sigma = 7^\circ$, $\delta_{\kappa}' = 80^\circ$, $\alpha_{\kappa}' = 9^\circ$. Так как надвигание происходило не в процессе пиления, а в промежутках между резанием, то $\varphi = 0$.

Значение действительного угла резания боковой режущей кромки режущего зубца определялось по формуле

$$\operatorname{tg} \delta_6 = \frac{\operatorname{tg} \beta_6 \operatorname{Cos}(\lambda \pm \varphi)^1}{\operatorname{Cos} \Sigma}$$

При заданных режимах пиления составляющие усилия с достаточной степенью точности были определены опытным путем. Определить нормальные силы на гранях зубцов в тот же момент, в который замеряются составляющие усилия во время опыта, теоретическим или экспериментальным путем весьма трудно, поэтому, чтобы решить уравнения и раскрыть закономерности изменения истинных сил, нужно знать коэффициенты трения.

Для определения величины коэффициентов трения, входящих в уравнения равновесия, были проведены опыты при трении скольжения стали по дереву в различных переходных поверхностях применительно к поперечному пилению и при различной влажности древесины.

Полученные опытные данные позволят найти нормальные силы на каждой грани зубцов путем решения системы указанных уравнений.

¹ Вывод формулы см. «Сборник научных Трудов БЛТИ», вып. VIII за 1956 г., стр. 200—203.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕХ СОСТАВЛЯЮЩИХ УСИЛИИ РАВНОДЕЙСТВУЮЩЕЙ СИЛЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ДРЕВЕСИНЫ ЗУБЦАМ

Для измерения трех составляющих усилий непосредственно на зубце автором был сконструирован трехкомпонентный тензOMETрический динамометр, дающий зубцу три степени свободы и имеющий в качестве датчиков электротензометры.

Схема действия его показана на рис. 2. Прибор состоит из следующих основных частей: разъемной обоймы (1) с хвостовиком (2), внутренней прямоугольной коробки (3) с полу-болтами и гнездами для подшипников, державка зубца (4) с отверстием для оси O_1 и направляющими для ползуна (5), электротензометров (10, 11, 16), стойки (6) и кронштейнов (12, 13) для крепления датчиков.

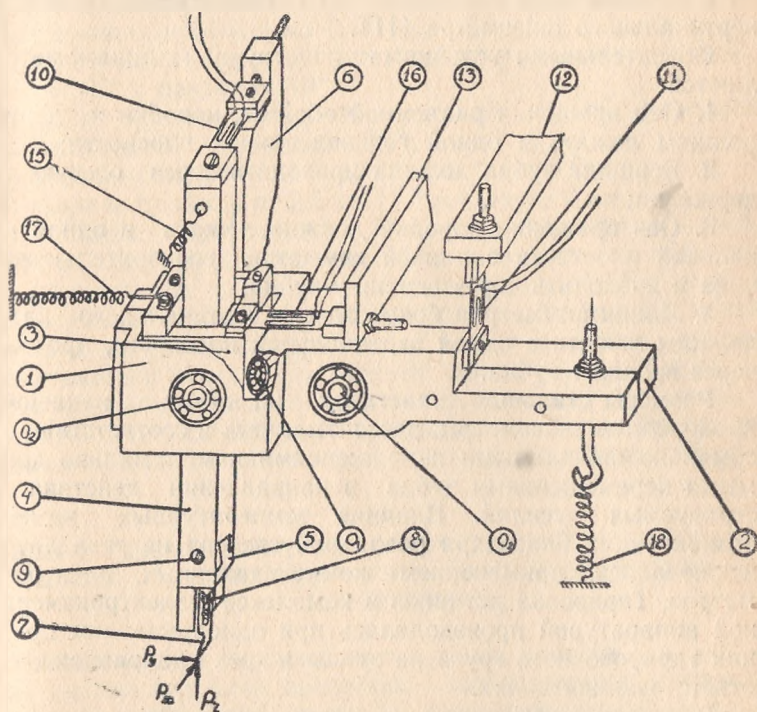


Рис. 2.

Режущий зубец (7) укрепляется в канавке ползуна болтами (8) и может перемещаться в вертикальной плоскости при ослаблении болтов. Ползун имеет поперечное перемещение в направляющих, выфрезерованных в нижнем конце державки, тем достигается удобство установки зубцов на различную ши-

рину пропила. После установки стопорный винт 9 зажимается. Державка вставляется в прямоугольную коробку и крепится к оси O_1 , концы которой входят в шарикоподшипники, укрепленные в гнездах коробки.

Под действием горизонтальной составляющей P_x державка поворачивается вокруг оси O_1 и тензометр (10) получает растягивающие деформации, преобразует их в электрические импульсы, идущие на усилитель. Предварительное натяжение тензометров создается спиральными пружинами (15, 17, 18).

Поперечная составляющая P_y воспринимается тензометром (16), один конец которого прикрепляется к верхнему краю прямоугольной коробки, а второй конец нарезным хвостовиком с гайкой крепится к кронштейну (13).

Под действием вертикальной составляющей P_z разъемной обоймы через полуоси коробки получает вращение вокруг оси O_3 в вертикальной плоскости, чем достигается деформация вертикального тензометра (11).

Обязательными условиями конструкции динамометра являются:

1. Оси вращения разъемной обоймы, коробки и державки должны лежать в одной горизонтальной плоскости;

2. Вершина зубца должна проходить через осевую линию державки;

3. Ось вращения коробки должна лежать в одной вертикальной плоскости с линией симметрии горизонтального датчика и проходить через вершину зубца;

4. Линии симметрии бокового и вертикального датчиков должны лежать в одной вертикальной плоскости, проходящей через вершину зубца.

Размеры стальных пластинок, на которые наклеивались проволочные тензометры, рассчитывались в соответствии с минимально ожидаемыми напряжениями и минимально допустимыми перемещениями зубца в направлении действия регистрируемых усилий. Влияние температурных изменений возникающих благодаря различной степени нагрева датчиков исключалось применением компенсационных электротензометров. Тарировка датчиков в комплексе с электроизмерительной аппаратурой производилась при одновременном приложении тарировочного груза на зубцы в трех направлениях в соответствующих долях.

В качестве измерительной схемы принимался неравноплечный, равноплечный электрический мостик, в диагональ которого включался трехкаскадный усилитель. Питание моста осуществлялось от генератора с частотой тока 2000 гц и напряжением до 10 в. Выход моста падался на вход усилителя, от которого ток поступал на шлейф осциллографа. В цепи, проходя через петлю магнитно-электрического вибратора, отклоняет зеркальце, освещенное пучком света, в соот-

ствии с изменяющимися по величине усилиями, действующими на тензодатчик. Луч, отбрасываемый зеркальцем, попадает на движущуюся с постоянной скоростью фотобумагу и фиксирует на ней в некотором масштабе графическое изображение регистрируемого усилия.

Одновременно фиксировались три составляющие усилия, три составляющие на режущем зубце или две составляющие на скалывающем и одна (для контроля) на режущем зубцах.

Образцы подопытной древесины, выпиленные из свежерубленной сосны, закреплялись на продольно-поперечном суппорте с автоматическим возвратно-поступательным движением. Пиление производится комплектом зубцов с профилем пильных цепей, зубчатый венец которых имел один скалывающий зубец и пару режущих, расположенных в шахматном порядке.

Было проделано 390 опытов и записано 1120 осциллограмм при следующих переменных факторах:

- 1) угле резания короткой режущей кромки режущего зубца от 30° до 130° с разрядом 10° ;
- 2) углах заточки передней и задней граней режущего зубца от 30° до 80° с разрядом 10° ;
- 3) величине подачи от 0,1 до 0,9 мм, через 0,2 мм;
- 4) ширине пропила от 2,5 до 12,5 мм, через 2 мм;
- 5) влажности древесины от 10 до 90% с интервалом 10%.

Для каждого из приведенных факторов записывались пять осциллограмм при одинаковых условиях пиления. По каждой осциллограмме—кривой изменения усилия замерялись максимальные и минимальные ординаты и определялось среднearифметическое усилие. Полученные таким образом опытные данные обрабатывались методом математической статистики, в результате чего установлена корреляционная связь между отдельными составляющими и переменными факторами пиления.

ВЛИЯНИЕ УГЛА РЕЗАНИЯ КОРОТКОЙ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ δ_k НА ТРИ СОСТАВЛЯЮЩИЕ СИЛЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ДРЕВЕСИНЫ

Изменение угла δ_k оказывает сильное влияние на деформации снимаемого слоя древесины. Исследования показали, что при $\delta_k = 30^\circ$ удельное давление на передней грани режущего зубца равно $3,9 \text{ кг/мм}^2$, при 70° — $6,2 \text{ кг/мм}^2$, а при 130° — $24,7 \text{ кг/мм}^2$. Это говорит за то, что процесс пиления происходит при удельных давлениях, превышающих временное напряжение разрушения древесины сжатием.

В результате исследования процесса пиления при условиях, что влажность древесины 30%, величина подачи 0,3 мм, ширина пропила 3,0 мм, углы заточки граней 60° , угол наклона

задней грани 10° , получены вероятные значения составляющих усилий на режущем зубце в зависимости от угла δ_k . Приводим эти значения в табл. 1.

Таблица 1

Усилие в кг	δ_k°					
	30	50	70	90	110	130
P_x	0,89	0,97	1,21	1,58	2,14	2,84
P_z	0,65	0,29	0,13	0,61	1,14	1,73
P_y	0,22	0,18	0,10	0,01	0,13	0,29
P	1,26	1,03	1,22	1,68	7,42	3,34

Анализ зависимости составляющих усилий на режущем зубце от угла резания короткой режущей кромки, как показали исследования, дает основание утверждать, что:

1. С увеличением угла δ_k от 30° до 60° усилие резания возрастает на 19%, а при дальнейшем увеличении угла δ_k степень возрастания усилия резания увеличивается.

2. Вертикальная составляющая при увеличении данного угла свыше 64° возрастает в сторону отжима и составляет при 70° только 10% от усилия резания, а при 130° —60%. С уменьшением угла ниже 64° зубец затягивается в древесину.

3. Поперечная составляющая при изменении угла δ_k от 91° до 30° возрастает в сторону отжима зубца во внутрь пропила, а при увеличении угла от 91° до 130° зубец затягивается в стенку пропила.

4. Равнодействующая сила противодействия древесины на режущий зубец $P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2 + P_y^2}$ в функции угла резания δ_k переходит через минимум, соответствующий углу в 50° .

ВЛИЯНИЕ УГЛА ЗАТОЧКИ ПЕРЕДНЕЙ ГРАНИ РЕЖУЩЕГО ЗУБЦА β_6 НА ТРИ СОСТАВЛЯЮЩИЕ УСИЛИЯ

Угол заточки передней грани режущего зубца β_6 является одним из угловых параметров, влияющих на положение передней грани относительно поперечного сечения снимаемого слоя древесины. С увеличением этого угла проекция равнодействующей силы P на направление резания будет увеличиваться, следовательно, возрастает и усилие резания P_x . Вследствие увеличения площади соприкосновения задней грани с дном пропила при увеличении угла β_6 возрастают силы отжима, но, с другой стороны, увеличение нормального давления на переднюю грань вызовет возрастание сил затягивания зубца в дре

вину. В результате вертикальная составляющая будет претерпевать незначительные изменения.

Проекция равнодействующей силы P на направление действия поперечной составляющей с уменьшением угла β_6 будет увеличиваться и, следовательно, зубец с большей силой будет прижиматься к стенке пропила. Силы прижима зубца вызовут оттягивание его в боковую плоскость пропила и тем больше, чем меньше угол β_6 .

Изложенные положения подтверждаются экспериментальными данными, приведенными в табл. 2. Постоянные факторы процесса пиления оставались прежние, кроме угла δ_k который был равен 65° .

Т а б л и ц а 2

Усилие в кг	β_6°					
	30	40	50	60	70	80
P_x	0,66	0,88	1,07	1,22	1,34	1,42
P_z	0,38	0,30	0,25	0,22	0,21	0,26
P_y	-0,45	-0,26	-0,08	-0,07	-0,15	0,20
P	0,90	0,95	1,09	1,24	1,37	1,46

Из таблицы следует, что:

1. С увеличением угла β_6 степень возрастания усилия резания уменьшается.

2. Вертикальная составляющая с увеличением угла β_6 от 30 до 60° уменьшается на 45% , увеличение этого угла сверх 70° ведет к увеличению силы надвигания.

3. Поперечная составляющая при заточке передней грани под углом около 55° близка к нулю; увеличение угла заточки от этого предела вызывает возрастание поперечных сил в сторону отжима. Величина угла заточки передней грани 55° , следовательно, будет наиболее выгодной, так как при этом наблюдается минимум поперечных сил и отсутствие боковых вибраций зубцов.

ЗАВИСИМОСТЬ ВЕЛИЧИНЫ ТРЕХ СОСТАВЛЯЮЩИХ УСИЛИИ ОТ УГЛА СКОСА ЗАДНЕЙ ГРАНИ β_3

Увеличение угла скоса задней грани приводит к возрастанию площади соприкосновения передней грани с древесиной при одной и той же подаче, а также увеличению отгиба подрезанного слоя. Зубец встречает большее сопротивление и, следовательно, усилие резания возрастает.

Поперечная составляющая с увеличением угла β_3 увеличивается в сторону отжима зубца от стенки пропила, так как проекция нормальных сил N_n на ось Y при этом уменьшается что приводит к уменьшению противоположно направленных сил прижима зубца к плоскости пропила.

С увеличением угла β_3 , что приводит к увеличению площади соприкосновения задней грани с дном пропила, увеличиваются силы отжима со стороны деформированных волокон дна пропила и потому вертикальная составляющая будет возрастать.

Результаты экспериментального исследования, подтверждающие эти положения, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Усилие в кг	β_3°					
	30	40	50	60	70	80
P_x	0,80	0,85	0,99	1,20	1,50	1,87
P_z	0,10	0,12	0,15	0,19	0,28	0,39
P_y	-0,07	-0,08	0,04	0,13	0,25	0,40
P'	0,80	0,85	1,00	1,22	1,58	1,94

ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПОДАЧИ НА СИЛОВОЕ ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ ДРЕВЕСИНЫ ПРОНИКНОВЕНИЮ ЗУБЦОВ

Предшествующие работы по исследованию процесса пиления не ставили задачу определить третью поперечную составляющую силу и потому использование данных этих работ не позволяет установить характер зависимости нормальных и касательных сил от величины подачи.

В результате опытов, проводимых при условии, что влажность древесины 30%, ширина пропила 8,5 мм, $\delta_k = 65^\circ$, $\beta_k = \beta_3 = 58^\circ$, $\alpha_k = 10^\circ$, $\delta_k' = 80^\circ$, $\alpha_k = 9^\circ$, получены вероятные значения трех составляющих на режущем и двух—на скалывающем зубцах.

Эти данные приведены в табл. 4.

На основании табличных данных и анализа силового противодействия древесины режущим и скалывающим зубцам в шахматном (несимметричном) их расположении установили:

1. Горизонтальная составляющая на режущем зубце с увеличением подачи от 0,1 до 0,3 мм возрастает на 85%, при дальнейшем увеличении подачи на 0,2 мм степень роста уменьшается.

2. С увеличением подачи до 0,4 мм вертикальная составляющая действует в сторону отжима и уменьшается; при до-

нейшем увеличении подачи вертикальная составляющая возрастает в сторону затягивания зубца в древесину.

Таблица 4

Усилие в кг	h—подача в мм				
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
P_x	0,81	1,50	2,48	3,81	5,56
P_z	0,27	0,10	-0,07	-0,25	-0,42
P_y	0,21	0,35	0,46	0,56	0,64
P_x'	1,02	1,42	1,71	1,87	1,92
P_z'	0,58	0,65	0,69	0,68	0,65

3. Поперечная составляющая действует в сторону затягивания режущего зубца в стенку пропила и увеличивает развод зубцов. С увеличением подачи от 0,1 до 0,3 мм поперечная составляющая возрастает на 65%, при дальнейшем увеличении подачи степень роста P_y уменьшается, что можно объяснить возрастающим противодействием древесины со стороны плоскости пропила.

4. Возрастание усилия резания на скалывающем зубце особенно интенсивно при малой величине подачи. Так, с увеличением подачи от 0,1 до 0,3 мм P_x' возрастает на 40%, при дальнейшем увеличении подачи на 0,2 мм увеличение P_x' составляет только 20%.

5. Вертикальная составляющая, действующая на скалывающий зубец, при увеличении подачи достигает максимума при величине подачи 0,5 мм. Уменьшение отжима скалывающего зубца при больших подачах объясняется тем, что режущий зубец при этом, отгибая передней гранью снимаемый слой, больше расслаивает его и деформирует.

ЗАВИСИМОСТЬ ТРЕХ СОСТАВЛЯЮЩИХ УСИЛИЙ ОТ АБСОЛЮТНОЙ ВЛАЖНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ W

Влажность древесины оказывает различное влияние на ее физико-механические свойства. Твердость, жесткость, сопротивление изгибу, сжатию и скалыванию снижаются с увеличением влажности, а сопротивление трению и упругость возрастают. Зависимость сил противодействия древесины пилению от влажности изучалась неоднократно, но каждый раз получались противоречивые результаты. Данные исследований, проведенных при этих условиях и при величине подачи 0,2 мм, приведены в табл. 5.

Из данных таблицы следует, что:

1. С увеличением влажности древесины усилие резания на режущем зубце снижается, причем это снижение убывает с уве-

личением влажности. Усилие резания на скалывающем зубце наоборот, незначительно возрастает;

Таблица 5

Усилие в кг	W				
	10%	30%	50%	70%	90%
P_x	1,34	1,22	1,13	1,09	1,07
P_z	0,14	0,19	0,24	0,29	0,34
P_y	-0,23	-0,18	-0,07	0,09	0,31
P_x'	1,25	1,31	1,37	1,40	1,43
P_z'	0,79	0,84	0,88	0,92	0,97

2. Увеличение влажности древесины на 20% вызывает рост сил отжима на режущем зубце в среднем на 12%, а на скалывающем—на 5%;

3. Боковые силы, действующие на режущий зубец, или отжимают зубец от плоскости пропила, если влажность выше 60%, или затягивают его в массив древесины, если влажность ниже 60%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грубе А. Э. Станки и инструменты по деревообработке, 1949.
2. Бершадский А. Л. Резание как технологический процесс, 1951.
3. Зорев Н. Н. Новые исследования в области резания металлов. ЦНИИТМАШ, 1948.
4. Комаров Ю. М. Диссертация на тему: «Исследование нормальных сил и сил трения на рабочих гранях зубцов цепных пил при поперечном пилении», 1951.