

УДК 674.053:621.934

В.К. Пашков, С.В. Щепочкин

Уральский государственный лесотехнический университет

Пашков Валентин Кузьмич родился в 1933 г., окончил в 1955 г. Ленинградскую лесотехническую академию, доктор технических наук, профессор кафедры станков и инструментов Уральского государственного лесотехнического университета. Имеет около 300 печатных работ в области теплофизики резания древесины.

Тел.: (343) 262-97-33



Щепочкин Сергей Владимирович родился в 1981 г., окончил в 2003 г. Уральский государственный лесотехнический университет, старший преподаватель кафедры станков и инструментов УГЛТУ. Имеет 16 печатных работ в области теплофизики резания древесины.

E-mail: art-sit@yandex.ru



О ТЕПЛОВОМ БАЛАНСЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ КРУГЛЫМИ ПИЛАМИ

В тепловом балансе резания древесины круглыми пилами экспериментально определена расходная часть теплоты, отводимая стружкой и заготовкой.

Ключевые слова: тепловой баланс, круглая пила, температура, стружка.

Распределение температуры в зоне резания характеризуется уравнением теплового баланса

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5, \quad (1)$$

где Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 – теплота, выделяющаяся в плоскости стружкообразования в результате пластической деформации и разрушения древесины и от сил трения соответственно по передней, задней и боковым поверхностям лезвия;

q_1, q_2, q_3, q_4, q_5 – стоки отводимой теплоты из зоны резания стружкой, инструментом, обрабатываемой заготовкой в окружающую среду и приграничные слои соответственно по задней и передней поверхностям лезвия.

Особенности тепловых процессов в связи с деформированием древесины пилами изучены недостаточно. Теплота, образующаяся при деформировании, как и физические явления, происходящие при этом, не учитываются. Вместе с тем следует отметить, что сведения о калориметрических измерениях составляющих расходной части теплового баланса отсутствуют.

Наиболее подробно вопросы теплового баланса при резании рассмотрены в работе [3], где основным источником теплоты считается трение по поверхностям контакта лезвия с древесиной. Теплота деформации не рассматривается из-за ее относительной малости.

Известно [3], что вся теплота от трения, возникающая при резании древесины, в виде одностороннего потока поступает в инструмент из-за низкой тепло- и температуропроводности древесины. Для оценки интенсивности тепловых потоков от трения передней Q_2 и задней Q_3 поверхностей

в работе [4] экспериментально определены формы эпюр и значения удельных сил трения по поверхностям лезвия для продольного $\tau(l)_{//}$, поперечного $\tau(l)_{\#}$ и торцевого $\tau(l)_{\perp}$ резания.

В работах [4, 6] приведена качественная оценка относительной значимости составляющих теплового баланса при резании. Авторы [4] считают, что через зуб (резец) инструмента отводится относительно небольшая доля теплоты из общего баланса. В работе [6] выполнен расчет количества теплоты, поступающей в диск пилы (без учета теплоты, идущей на нагрев режущей части) для конкретных условий распиловки дубовых досок. Мощность резания и эквивалентное количество теплоты составляют соответственно 2,9 кВт и 0,695 ккал/с (2898 Вт). Количество теплоты, необходимое для поддержания теплового состояния диска пилы, $Q_d = 0,156$ ккал/с (650 Вт) или 22 % от общего количества эквивалентной тепловой мощности процесса (от 0,695 ккал/с (2898 Вт)).

По результатам исследований [2] были сделаны следующие выводы:

при контакте поверхности зубьев пилы с древесиной на их нагрев расходуется свыше 70 % общего количества эквивалентной тепловой мощности при резании;

большая часть этой теплоты (из 70 %) распространяется через режущую часть пилы (зубья) в окружающую среду путем теплового излучения и теплоотдачи;

доля теплоты, нагревающей диск, составляет 7,5...15,0 % от расходуемой на нагрев пилы или 5,25...10,50 % от общего количества теплоты, эквивалентной мощности на резание.

Оценки интенсивности тепловых потоков хотя и одного порядка, но количественно существенно различаются. Это можно объяснить принятым законом распределения температуры, числом кольцевых участков, на которые разбивается диск при расчете [6], ограниченным количеством точек измерения температуры.

При разбиении диска на 40 кольцевых участков вместо 4 [6], известном интегральном коэффициенте теплоотдачи $\alpha_p = 4,83$ Вт/°С [10] и температурном напоре $\vartheta_{\gamma+1} = 60$ °С поток теплоты, отдаваемой в окружающую среду при стационарном температурном поле [10],

$$Q_d = \alpha_p \vartheta_{\gamma+1} = 4,83 \cdot 60 = 290 \text{ Вт.} \quad (2)$$

Интегральный коэффициент теплоотдачи – это величина, численно равная количеству теплоты, расходуемой на нагревание диска пилы на 1 °С в установившемся тепловом режиме. Интегральные коэффициенты для всех типоразмеров круглых плоских пил по ГОСТ 980–80 приведены в [8]. Доля теплоты Q_d , расходуемой на поддержание стационарного теплового состояния диска, будет уже не 22 %, а $K = 290/2898 \cdot 100 \% = 10 \%$.

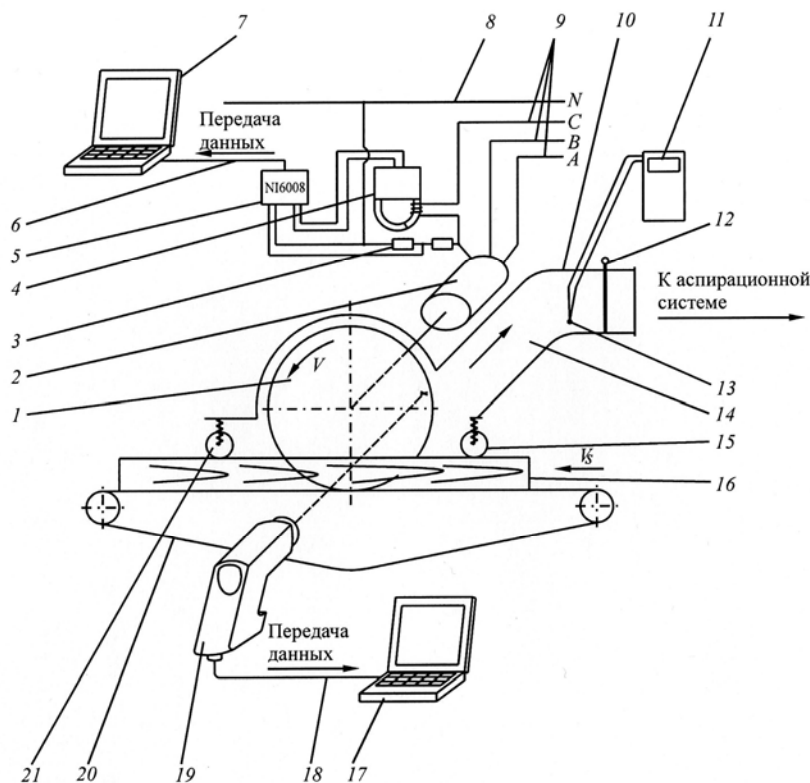
По результатам экспериментальных исследований [1, 10] установлено, что на спокойном воздухе доля теплоты Q_d , расходуемой на нагрев плоских пил с разведенным зубом, колеблется от 2,0 до 10,0 %, твердосплавных – от 0,6 до 2,0 %. Эти значения близки к результатам работы [2] – соответственно 7,5...15,0 и 5,25...10,50 %.

Наличие достоверной информации [1, 5, 7, 10] о расчете температурных полей и тепловых потоков дисков пил позволило определить количество теплоты $Q_{p.ч.}$, отводимой от режущей части пилы при резании. Соотношение $(Q_{p.ч.}/Q_d)100\%$ имеет устойчивое значение – 78 %.

Следовательно в рассматриваемом примере при $Q_d = 290$ Вт (22 %) количество теплоты, отводимой через режущую часть, $Q_{p.ч.} = (78/22)290 = 1028$ Вт.

Для оценки доли теплоты, отводимой стружкой Q_c из зоны резания, необходимо знать достоверную информацию о ее температуре. С этой целью были поставлены два многофакторных эксперимента ПФЭ 2^k. Как известно, количество теплоты, выделяющейся в зоне резания, является эквивалентом мощности на резание, которая в свою очередь зависит от многих факторов. Первостепенное влияние на мощность при резании оказывают высота пропила и скорость подачи. Поэтому изучали зависимость температуры стружки от двух факторов: высоты пропила (толщина заготовки) h и скорости подачи V_s .

Распиловки выполняли на экспериментальной установке, созданной на базе прирезного станка ЦДК-4. Блок-схема измерительной системы установки представлена на рисунке.



В качестве постоянных были приняты следующие факторы: обрабатываемый материал – древесина сосны, ее влажность $W = (10 \pm 2) \%$, частота вращения пилы $n = 2940 \text{ мин}^{-1}$, температура окружающего воздуха $t_{\text{окр}} = 19,9 \text{ }^\circ\text{C}$.

Первый эксперимент – пиление стальной пилой (ГОСТ 980–80): диаметр $D = 300 \text{ мм}$, толщина $s = 2,0 \text{ мм}$, число зубьев $z = 48$, уширение зубчатого венца на сторону $\Delta s = 0,6 \text{ мм}$, передний угол $\gamma = 22^\circ$, задний угол $\alpha = 26^\circ$, угол заострения $\beta = 42^\circ$.

Второй эксперимент – пиление твердосплавной пилой (ГОСТ 9769–79): $D = 300 \text{ мм}$, $s = 2,2 \text{ мм}$, $z = 48$, $\Delta s = 0,5 \text{ мм}$, $\gamma = 20^\circ$, $\alpha = 17^\circ$, $\beta = 53^\circ$.

При проведении эксперимента устанавливали требуемый типоразмер пилы 1, прижимной суппорт станка (прижимные вальцы 15, 21) настраивали на необходимую толщину распиливаемого материала 16, а механизм подачи 20 – на необходимую скорость подачи, инфракрасный пирометр 19 крепили против окружности впадин зубьев пилы, в патрубок 10 через отверстие вводили хромель-алюмелевую термопару 13, подключенную к электронному измерителю температуры 11. В момент включения станка и аспирационной системы заслонка 12 должна находиться в открытом положении. Затем включали измерительные приборы: пирометр 19, передающий значения температуры диска пилы на компьютер 17; измеритель температуры 11, на дисплей которого выводится текущее значение температуры стружки 14; токовые клещи 4 и цифровой осциллограф 5, передающий данные о напряжении и токе, которые поступают на электродвигатель 2 механизма резания. С этого времени и до окончания опыта регистрируют температуру стружки в патрубке 10, температуру диска пилы на окружности впадин зубьев и электрическую активную мощность, потребляемую электродвигателем механизма резания.

Затем в станок без межторцовых разрывов подавали сосновые заготовки длиной 1,5 м. После достижения момента стабилизации температуры, который определялся окончанием роста температуры диска пилы на окружности впадин зубьев по пирометру, выключалась аспирационная система (отсос стружки), закрывалась заслонка и патрубок заполнялся стружкой. Температуру стружки фиксировали на дисплее измерителя температуры. За измеренное значение температуры стружки принимали максимальную температуру на дисплее измерителя. Как только заканчивался рост температуры стружки и начиналось ее остывание, опыт прекращали.

Матрицы планирования и результаты экспериментов при пилении круглой стальной пилой и круглой твердосплавной пилой приведены в табл. 1.

По результатам опытов (табл. 1) были построены математические модели зависимости температуры стружки от изучаемых факторов [9] при пилении стальной пилой:

$$\vartheta_c = 17,79 + 0,752h + 0,276V_S - 0,01hV_S; \quad (3)$$

Таблица 1

**Матрица планирования и результаты эксперимента
при пилении круглыми пилами**

Значения факторов				Температура, °С		Мощность резания, $N_{рез}$, кВт
натуральные		нормализованные		стружки ϑ_c	на периферии диска пилы ϑ_d	
$h \cong x_1$, м	$V_S \cong x_2$, м/мин	x_1	x_2			
Стальная пила						
0,0270	15	-1	-1	38,1	28,5	2,250
0,0492	15	+1	-1	51,4	31,2	4,930
0,0270	30	-1	+1	38,1	29,0	3,423
0,0492	30	+1	+1	48,0	35,9	8,032
Твердосплавная пила						
0,0270	15	-1	-1	36,4	28,4	1,800
0,0492	15	+1	-1	47,1	33,5	4,443
0,0270	30	-1	+1	36,7	32,8	3,136
0,0492	30	+1	+1	45,6	33,7	7,145

твердосплавной пилой:

$$\vartheta_c = 20,9 + 0,563h + 0,166V_S - 0,005hV_S. \quad (4)$$

Количество теплоты Q_c , отводимой стружкой, определяли по формуле [11]

$$Q_c = C_p \rho V_c \Delta\vartheta_c, \quad (5)$$

где C_p – теплоемкость сухой древесины сосны, $C_p = 2,0$ кДж/(кг·°С);

ρ – плотность древесины сосны, $\rho = 500$ кг/м³;

V_c – секундный объем срезаемых стружек, м³/с,

$$V_c = V_S b h / 60;$$

b – ширина пропила, м;

h – высота пропила (толщина заготовки), м;

$\Delta\vartheta_c$ – нагрев стружки, °С,

$$\Delta\vartheta_c = (\vartheta_c - t_{окр}).$$

Доля мощности резания, идущая на нагрев стружки,

$$k = \frac{Q_c}{N_{рез}}. \quad (6)$$

Результаты расчетов (по формулам (5), (6)) количества теплоты, отводимой стружкой, и доли мощности резания, идущей на нагрев стружки, приведены в табл. 2.

Математические модели доли мощности резания, идущей на нагрев стружки, в зависимости от высоты пропила и скорости подачи в натуральных значениях факторов при пилении стальной пилой:

$$k = -0,01348 + 5,892 \cdot 10^{-3} h + 7,5 \cdot 10^{-3} V_S - 1,129 \cdot 10^{-4} h V_S; \quad (7)$$

твердосплавной пилой:

$$k = 0,14245 + 1,802 \cdot 10^{-3} h + 1,789 \cdot 10^{-3} V_S + 3 \cdot 10^{-5} h V_S. \quad (8)$$

Таблица 2

Расчет количества теплоты, отводимой стружкой

h , м	V_S , м/мин	ϑ_c , °С	b , м	V_c , м ³ /с	Q_c , кДж/с	$N_{рез}$, кВт	k
Стальная пила							
0,0270	15	38,1	0,00389	$2,63 \cdot 10^{-5}$	0,478	2,250	0,212
0,0492	15	51,4	0,00389	$4,78 \cdot 10^{-5}$	1,507	4,930	0,306
0,0270	30	38,1	0,00389	$5,25 \cdot 10^{-5}$	0,956	3,423	0,279
0,0492	30	48,0	0,00389	$9,57 \cdot 10^{-5}$	2,689	8,032	0,335
Твердосплавная пила							
0,0270	15	36,4	0,00372	$2,51 \cdot 10^{-5}$	0,414	1,800	0,230
0,0492	15	47,1	0,00372	$4,58 \cdot 10^{-5}$	1,245	4,443	0,280
0,0270	30	36,7	0,00372	$5,02 \cdot 10^{-5}$	0,844	3,136	0,269
0,0492	30	45,6	0,00372	$9,15 \cdot 10^{-5}$	2,352	7,145	0,329

Выполненные по формуле (5) расчеты показали, что Q_c и $Q_{заг}$ составляют соответственно 1,6 кДж/с (1600 Вт) и 0,094 кДж/с (94 Вт).

Исследуя расходную часть теплового баланса, можно сделать следующие выводы:

сток теплоты из зоны резания в стружку $q_1 = Q_c = 1600$ Вт;

сток теплоты в инструмент для прогрева лезвия зуба и корпуса инструмента $q_2 = Q_{p.ч} + Q_d$ (на прогрев инструмента требуется 1,5...2,0 мин); эта часть теплоты имеет постоянное значение для установившегося теплового режима $q_2 = 290 + 1028 = 1318$ Вт (температура прогрева 11...15 Вт);

сток теплоты в обрабатываемую заготовку $q_3 = 94$ Вт;

сток теплоты в окружающую среду для установившегося теплового режима через инструмент $q_4 = Q_{p.ч} + Q_d = 1318$ Вт;

теплота расходной части уравнения (1) $\sum_{i=1}^5 q_i = 3012$ Вт $>$ $\sum_{i=1}^5 Q_i = 2898$ Вт;

относительная ошибка расчета $\varepsilon_{\Sigma q} = (2898 - 3012) / 2898 = 0,039$ или 3,9 %;

доля теплоты, отводимая из зоны резания через инструмент, для пил стальных с разведенным зубом $q_4 / Q_{общ} = 1318 / 2898 = 0,45$ или 45 %;

высота пропила оказывает наибольшее влияние на температуру стружки и количество теплоты, отводимой стружкой;

при равных условиях мощность, затрачиваемая на резание при пилении твердосплавной пилой, на 8...20 % меньше, чем стальной с разведенным зубом;

необходимо проведение дополнительных калориметрических исследований расходной части теплового баланса при пилении круглыми пилами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование нагрева дисков пил при пилении в зависимости от технологических факторов и конструктивных параметров пил [Текст]: отчет о НИР / УЛТИ; рук. В.К. Пашков. – Тема 12/69 ; ГР 69014442. – Свердловск, 1969. – 112 с.
2. Конов, В.Н. Исследование влияния тепловых явлений на работоспособность круглых дереворежущих пил [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук (13.00.01) / Конов Виктор Николаевич ; СПбЛТА. – СПб., 1979. – 26 с.
3. Лейхтлинг, Р.А. Исследование нагрева дереворежущего инструмента в процессах резания [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук : (13.00.01) / Лейхтлинг Роберт Адольфович ; Сибирский технолог. ин-т. – Красноярск, 1967. – 23 с.
4. Моисеев, А.В. Износостойкость дереворежущего инструмента [Текст] / А.В. Моисеев. – М.: Лесн. пром-сть, 1981. – 110 с.
5. Пашков, В.К. Номограммы для расчета тепловых полей охлаждаемых дисков пил [Текст] / В.К. Пашков, А.С. Красиков // Станки и инструменты деревообрабатывающих производств. – Л.: ЛТА, 1986. – С. 61 – 65.
6. Пашков, В.К. О количестве теплоты, идущей на нагрев дисковых пил [Текст]: сб. науч. тр. / В.К. Пашков. – Свердловск: УЛТИ, 1969. – Вып. 20. – С. 190 – 195.
7. Пашков, В.К. Тепловое поле вращающегося охлаждаемого диска пилы [Текст] / В.К. Пашков, А.С. Красиков // Станки и инструменты деревообрабатывающих производств. – Л.: ЛТА, 1984. – С. 48 – 51.
8. Пашков, В.К. Теплофизика резания древесины круглыми пилами [Текст]: моногр. / В.К. Пашков. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2007. – 311 с.
9. Пижурин, А.А. Исследования процессов деревообработки [Текст] / А.А. Пижурин, М.С. Розенблит. – М.: Лесн. пром-ть, 1984. – 232 с.
10. Разработка номографического метода расчета температурных перепадов в дисках круглых пил [Текст]: отчет о НИР / УЛТИ; рук. В.К. Пашков. – Тема 47/68; ГР 68034143. – Свердловск, 1968. – 71 с.
11. Уголев, В.Н. Испытания древесины и древесных материалов [Текст] / В.Н. Уголев. – М.: Лесн. пром-сть, 1965. – 251 с.

Поступила 29.11.08

V.K. Pashkov, S.V. Shchepochkin
Ural State Forest-Engineering University

On Heat Balance of Wood Cutting Process by Circular Saws

The charge part of heat produced by shaving and workpiece is experimentally determined in the heat balance of wood cutting by circular saws.

Keywords: heat balance, circular saw, temperature, shavings.
