

Введение На разработку ресурсоэнергосберегающих технологий переработки древесных материалов направлены научные направления кафедр лесотехнического профиля [1,2]. Достоверная информация об энергетических показателях процессов механической обработки различных материалов, в том числе профильного фрезерования древесины различных пород необходима для качественного проектирования технологического оборудования, эффективного использования установленных электродвигателей по мощности, что снижает себестоимость готового изделия. К таким показателям относится мощность, потребляемая на процесс резания при различных режимах обработки и геометрии режущего инструмента, а также сила резания. Последнюю представляют в виде трех составляющих: главную, радиальную и осевую, каждая из которых по-своему влияет на протекание процессов обработки. Главная составляющая силы резания определяет потребляемую мощность, а ее непостоянство вызывает крутильные колебания шпиндельного узла с установленным режущим инструментом; радиальная составляющая оказывает доминирующее влияние на упругие деформации элементов системы «станок – приспособление – инструмент – заготовка», от уровня и стабильности которых зависит геометрическая точность обработанных поверхностей. В этой связи важно знать не только численные значения энергетических показателей процессов механической обработки, но и их изменение в течение всего времени резания. Располагая этими данными можно эффективно управлять протеканием процесса резания, обеспечивая оптимальные режимы резания и выпуск качественной продукции. Сказанное особо актуально для построения эффективных процессов профильного фрезерования специфических древесных заготовок, каковыми являются крупные отходы лесопиления, характеризующиеся разнородностью свойств обрабатываемого материала, значительной нестабильностью формы и размеров. Для такого рода заготовок, например, периферийных сегментов, образующихся в процессе параболического раскрытия бревен, информация об энергетических показателях позволит прогнозировать не только удельные затраты электрической энергии, но и ожидаемую геометрическую точность обработанных поверхностей. Разработка математической модели мощности фасонного фрезерования и ее анализ

Результатирующая сила резания в процессе механической обработки древесины [3, 4] $P=kba$, (1) где k – удельная сила резания, Н/мм; b , a – ширина и толщина срезаемого слоя соответственно, мм. Формула (1) удобна при выполнении практических расчетов в виду своей простоты, в этом состоит ее неоспоримое достоинство, однако, она не позволяет установить непосредственные математические взаимосвязи режимов профильного фрезерования и конструктивных параметров фасонного режущего инструмента с энергетическими показателями. Объем древесины, снимаемый в процессе профильного фрезерования заготовки за время реза одним зубом фрезы, (2) где \bar{v} – среднее арифметическое значение максимальной и

минимальной площадью срезаемого слоя; соответственно радиус профиля и высота фасонной фрезы. Предельные значения площади срезаемого слоя: (3) (4) где подача заготовки на зуб фрезы; глубина резания, заданная режимом обработки; минимальный радиус фасонной фрезы, характерный для поперечной плоскости симметрии инструмента; максимальный радиус фасонной фрезы, характерный для плоскости каждого из торцов инструмента; скорость рабочей подачи заготовки; соответственно число зубьев и угловая скорость фасонной фрезы. Объем древесины, снимаемый в течение одной секунды, (5) где частота вращения фрезы. Математическая модель, связывающая мощность профильного фрезерования древесины, не имеющей сбежистости, с элементами режима резания и конструктивными параметрами фасонного режущего инструмента, примет вид: $(\arcsin(\frac{r}{R})) \cdot (\frac{v}{n})$. (6) где удельная работа резания при заданных расчетных условиях обработки, Дж/ [2, с. 278, 279]; частота вращения фрезы, ; табличное значение удельной работы резания; общий поправочный множитель; поправочный множитель соответственно на породу, влажность древесины, затупление лезвий фрезы, на угол резания и скорость резания; ; .. (7) Мощность резания при профильном фрезеровании сбежистой заготовки с положительным приращением припуска $(\arcsin(\frac{r}{R})) \cdot (\frac{v}{n})$, (8) где =); (9) текущее время фрезерования; средний статистический угол, характеризующий сбежистость заготовки. При профильном фрезеровании сбежистой заготовки с отрицательным приращением припуска $\arcsin(\frac{r}{R}) \cdot (\frac{v}{n})$, (10) где = =. (11) По моделям (6), (8), (10) можно выполнять расчеты мощности практически для любых режимов профильного фрезерования фасонными фрезами, допускаемых технической характеристикой применяемого оборудования. Определим с использованием программной среды Advanced Grapher влияние глубины резания на мощность фасонного фрезерования заготовки, не имеющей сбежистости, для трех нижеследующих режимов резания. Режим № 1: удельная работа резания для березы $K=2,85$ [5]; число зубьев фасонной фрезы $z=2$; частота вращения фрезы $n=4880$; скорость рабочей подачи заготовки ; радиус профиля фасонной фрезы $r=6,25$ см; высота фрезы $B=10$ см; минимальный и максимальный радиус фрезы соответственно 9 см. Режим № 2: $K=2,85$; $z=4$; $n=4000$; ; $r=6,25$ см; $B=10$ см; 9 см; Режим № 3: $z=2$; $n=4880$; м/мин; $r=6,25$ см; $B=10$ см; 9 см. Результаты расчетов мощности фрезерования березы на трех режимах резания приведены в табл. 1, а уравнения связи мощности с глубиной резания t , адаптированные к программной среде Advanced Grapher, имеют вид: 1. $(2.85 \cdot 2 \cdot 4880 / 60) \cdot 6.25 \cdot (\arcsin(10 / (2 \cdot 6.25))) \cdot ((100 \cdot 15) / (2 \cdot 4880)) \cdot (2 \cdot (t - 6.5 + (42.25 - (50 \cdot 15) / (2 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)}) - 9 + (81 \cdot ((50 \cdot 15) / (2 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)})$ (12) 2. $(2.85 \cdot 4 \cdot 4000 / 60) \cdot 8 \cdot (\arcsin(10 / (2 \cdot 8))) \cdot ((100 \cdot 10) / (4 \cdot 4000)) \cdot (2 \cdot (t - 6.5 + (42.25 - (50 \cdot 10) / (4 \cdot 4000))^{(4/2)})^{(2/4)}) - 9 + (81 \cdot ((50 \cdot 10) / (4 \cdot 4000))^{(4/2)})^{(2/4)})$ (13) 3. $(2.85 \cdot 2 \cdot 4880 / 60) \cdot 6.25 \cdot (\arcsin(10 / (2 \cdot 6.25))) \cdot ((100 \cdot 20) / (3 \cdot 4880)) \cdot (2 \cdot (t - 6.5 + (42.25 - (50 \cdot 20) / (2 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)}) - 9 + (81 \cdot ((50 \cdot 20) / (2 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)})$ (14) По модели (6) определена мощность

резания не только для древесины из березы, но и сосны и дуба, для которых удельная работа K , затрачиваемая на снятие одного кубического сантиметра древесины, соответственно равна 1,75 и 3,15 Джоуля [5]. На основании моделирования построены графики зависимостей глубины резания на мощность фрезерования древесины из сосны, березы и дуба, не имеющей сбежистости (рис. 1, а). Таблица 1 – Изменение мощности фрезерования в функции глубины резания древесины без сбежистости z , мм

z , мм	5	10	15	20	25	30
Режим профильного фрезерования № 1	4129	8258	12387	16517	20646	24776
Режим профильного фрезерования № 2	2565	5131	7696	10262	12827	15393
Режим профильного фрезерования № 3	3357	6715	10074	13432	16791	20150

а б Рис. 1 – Влияние глубины резания (а), скорости подачи (б) на мощность фрезерования древесины, не имеющей сбежистости: 1 – сосны; 2 – березы; 3 – дуба

Мощность профильного фрезерования древесины из сосны имеет минимальные значения, затем по степени ее возрастания следует береза, а самые большие численные значения мощности характерны для древесины из дуба, что объясняется значениями удельной работы для указанных пород древесины (для сосны $K=1,75$; для березы $K=2,85$ и для дуба $K=3,15$ Дж/). Влияние скорости подачи на мощность профильного фрезерования заготовки, не имеющей сбежистости, установлено также для трех режимов профильного фрезерования ($K=1,75$). 1. $z=4$; $n=6000$; $b=8$ см; $V=10$ см; $t=2$ см; 9 см; 2. $z=4$; $n=4000$; $b=10$ см; $V=12$ см; $t=1$ см; 9 см; 3. $z=6$; $n=4880$; $b=6,25$ см; $V=10$ см; $t=2$ см; 9 см. Уравнения связи мощности резания со скоростью рабочей подачи древесины для указанных режимов резания имеют вид:

- $$1. (1.75 \cdot 4 \cdot 6000 / 60) \cdot 8 \cdot (\text{asin}(10 / (2 \cdot 8))) \cdot ((100 \cdot) / (4 \cdot 6000)) \cdot (2 \cdot (2 - 6.5 + (42.25 - (50 \cdot) / (4 \cdot 6000))^{(4/2)})^{(2/4)} - 9 + (81 \cdot ((50 \cdot) / (4 \cdot 6000))^{(4/2)})^{(2/4)})); \quad (15)$$
- $$2. (1.75 \cdot 4 \cdot 4000 / 60) \cdot 10 \cdot (\text{asin}(12 / (2 \cdot 10))) \cdot ((100 \cdot) / (4 \cdot 4000)) \cdot (2 \cdot (1 - 6.5 + (42.25 - (50 \cdot) / (4 \cdot 4000))^{(4/2)})^{(2/4)} - 9 + (81 \cdot ((50 \cdot) / (4 \cdot 4000))^{(4/2)})^{(2/4)})); \quad (16)$$
- $$3. (1.75 \cdot 6 \cdot 4880 / 60) \cdot 6.25 \cdot (\text{asin}(10 / (2 \cdot 6.25))) \cdot ((100 \cdot) / (6 \cdot 4880)) \cdot (2 \cdot (2 - 6.5 + (42.25 - (50 \cdot) / (6 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)} - 9 + (81 \cdot ((50 \cdot) / (6 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)})). \quad (17)$$

Результаты моделирования мощности профильного фрезерования представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Мощность фрезерования в функции скорости рабочей подачи заготовки, не имеющей сбежистости, м/мин

Скорость подачи, м/мин	5	15	25	35	45	55
Режим профильного фрезерования № 1	315	945	1575	2205	2834	3463
Режим профильного фрезерования № 2	188	563	938	1312	1685	2056
Режим профильного фрезерования № 3	338	1014	1690	2366	3041	3717

Изменение мощности резания при профильном фрезеровании сосны, березы и дуба представлено на рис. 1, б, из которого следует, что в наибольшей степени мощность возрастает при обработке дуба. Влияние глубины резания на мощность профильного фрезерования сбежистой заготовки из сосны, березы и дуба установлено для нижеследующих режимов ($K=2,85$): 1. $z=2$; $n=4880$; $b=6,25$ см; $V=10$ см; $t=x$; 8 с; 9 см; $K=2,85$; 2. $z=4$; $n=4000$; м/мин; $b=6,25$ см; $V=10$ см; $t=x$; 8 с; 9 см. 3. $z=2$; $n=4880$; м/мин; $b=6,25$ см; $V=10$ см; $t=x$; 8 с; 9 см.

Уравнения, описывающие влияние глубины резания на мощность резания, для указанных трех режимов имеют вид:

$$1. (2.85 \cdot 2 \cdot 4880 / 60) \cdot 6.25 \cdot (\operatorname{asin}(10 / (2 \cdot 6.25))) \cdot ((100 \cdot 15) / (2 \cdot 4880)) \cdot (2 \cdot (t + (15 \cdot 10) \cdot (\tan(0.01)))) - 6.5 + (42.25 - (50 \cdot 15 / (2 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)} - 9 + (81 \cdot ((50 \cdot 15) / (2 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)} \quad (17)$$

$$2. (2.85 \cdot 4 \cdot 4000 / 60) \cdot 6.25 \cdot (\operatorname{asin}(10 / (2 \cdot 6.25))) \cdot ((100 \cdot 10) / (4 \cdot 4000)) \cdot (2 \cdot (t + (10 \cdot 8) \cdot (\tan(0.01)))) - 6.5 + (42.25 - (50 \cdot 10 / (4 \cdot 4000))^{(4/2)})^{(2/4)} - 9 + (81 \cdot ((50 \cdot 10) / (4 \cdot 4000))^{(4/2)})^{(2/4)} \quad (18)$$

$$3. (2.85 \cdot 2 \cdot 4880 / 60) \cdot 6.25 \cdot (\operatorname{asin}(10 / (2 \cdot 6.25))) \cdot ((100 \cdot 20) / (4 \cdot 4000)) \cdot (2 \cdot (t + (20 \cdot 8) \cdot (\tan(0.01)))) - 6.5 + (42.25 - (50 \cdot 20 / (4 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)} - 9 + (81 \cdot ((50 \cdot 20) / (4880))^{(4/2)})^{(2/4)} \quad (19) \text{ а}$$

б Рис. 2 – Влияние глубины резания (а) и скорости подачи (б) на мощность фрезерования сбежистой заготовки: 1 – сосна; 2 – береза; 3 – дуб Влияние скорости подачи на мощность резания при фрезеровании сбежистой заготовки установлено на следующих режимах ($K=1,75$): 1. $z=4$; $n=6000$; $r=8$ см; $V=10$ см; $t=2$ см; ; 16 с; 9 см; 2. $z=4$; $n=4000$; $r=10$ см; $V=12$ см; $t=1$ см; ; 16 с; 9 см; 3. $z=6$; $n=4880$; $r=6,25$ см; $V=10$ см; $t=2$ см; ; 14 с; 9 см. Уравнения, описывающие влияние скорости подачи сбежистой заготовки на мощность резания, для указанных трех режимов имеют вид (рис. 2а, б):

$$1. (1.75 \cdot 4 \cdot 6000 / 60) \cdot 8 \cdot (\operatorname{asin}(10 / (2 \cdot 8))) \cdot ((100 \cdot 16) / (4 \cdot 6000)) \cdot (2 \cdot (2 + (16) \cdot (\tan(0.01)))) - 6,5 + (42,25 - (50 \cdot 16 / (4 \cdot 6000))^{(4/2)})^{(2/4)} - 9 + (81 \cdot ((50 \cdot 16) / (4 \cdot 6000))^{(4/2)})^{(2/4)} \quad (20)$$

$$2. (1.75 \cdot 4 \cdot 4000 / 60) \cdot 10 \cdot (\operatorname{asin}(10 / (2 \cdot 10))) \cdot ((100 \cdot 16) / (4 \cdot 4000)) \cdot (2 \cdot (1 + (16) \cdot (\tan(0.01)))) - 6.5 + (42.25 - (50 \cdot 16 / (4 \cdot 4000))^{(4/2)})^{(2/4)} - 9 + (81 \cdot ((50 \cdot 16) / (4 \cdot 4000))^{(4/2)})^{(2/4)} \quad (21)$$

$$3. (1.75 \cdot 6 \cdot 4880 / 60) \cdot 6.25 \cdot (\operatorname{asin}(10 / (2 \cdot 6.25))) \cdot ((100 \cdot 14) / (6 \cdot 4880)) \cdot (2 \cdot (2 + (14) \cdot (\tan(0.01)))) - 6.5 + (42.25 - (50 \cdot 14 / (6 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)} - 9 + (81 \cdot ((50 \cdot 14) / (6 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)} \quad (22)$$

Сравнение результатов моделирования мощности резания при профильном фрезеровании заготовки, со сбежистостью и без таковой, показало, что в первом случае мощность резания больше, чем во втором. Наибольшее приращение мощности резания наблюдается в самом конце обработки сбежистой заготовки, и оно может превышать в разы мощность, характерную для обработки заготовки, не имеющей сбежистости. Полученные данные свидетельствуют о том, что без новых технических и технологических решений процесс профильного фрезерования отходов лесопиления реализовать невозможно.

Установлено также влияние радиуса профиля фрезы на мощность резания при обработке сбежистой заготовки на следующих режимах ($K=1,75$): 1. $z=2$; $n=4880$; $V=10$ см; $t=1,0$ см; ; 10 с; 9 см; 2. $z=4$; $n=5500$; $V=10$ см; $t=1,5$ см; ; 10 с; 9 см; 3. $z=4$; $n=6000$; $V=10$ см; $t=2$ см; ; 10 с; 9 см. Уравнения, описывающие влияние радиуса на мощность резания, для указанных режимов имеют вид:

$$1. (1.75 \cdot 2 \cdot 4880 / 60) \cdot (\operatorname{asin}(10 / (2 \cdot 10))) \cdot ((100 \cdot 10) / (2 \cdot 4880)) \cdot (2 \cdot (1 + (10 \cdot 10) \cdot \tan(0.01))) - 5 + (25 - (50 \cdot 10 / (2 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)} - 9 + (81 \cdot ((50 \cdot 10) / (2 \cdot 4880))^{(4/2)})^{(2/4)}; \quad (23)$$

$$2. (1.75 \cdot 4 \cdot 5500 / 60) \cdot (\operatorname{asin}(10 / (2 \cdot 15))) \cdot ((100 \cdot 15) / (4 \cdot 5500)) \cdot (2 \cdot (1.5 + (15 \cdot 10) \cdot \tan(0.01))) - 5 + (25 - (50 \cdot 15 / (4 \cdot 5500))^{(4/2)})^{(2/4)} - 9 + (81 \cdot ((50 \cdot 15) / (4 \cdot 5500))^{(4/2)})^{(2/4)}; \quad (24)$$

$$3 \cdot (1.75 \cdot 4 \cdot 6000 / 60)^{**} (\arcsin(10 / (2 \cdot))) \cdot ((100 \cdot 20) / (4 \cdot 6000)) \cdot (2 \cdot (2 + (20 \cdot 10) \tan(0.01)) - 5 + (25 - (50 \cdot 20) / (4 \cdot 6000))^{(4/2)})^{(2/4)} - 9 + (81 \cdot ((50 \cdot 20) / (4 \cdot 6000))^{(4/2)})^{(2/4)}). \quad (25)$$

Моделирование мощности резания при профильном фрезеровании древесной заготовки, не имеющей сбежистости, показал, что наибольшее влияние на значение мощности оказывают глубина резания и скорость рабочей подачи заготовки, в меньшей степени влияет радиус профиля фасонной фрезы. Из рассмотренных пород древесины наибольшая мощность резания характерна для фасонного фрезерования дуба, в меньшей степени – для обработки березы, а самая малая мощность – для сосны. Сбежистость обрабатываемой заготовки с положительным приращением припуска оказывает наибольшее влияние на уровень потребляемой мощности по сравнению с элементами режима резания и геометрическими показателями фасонной фрезы. Установлено, что сбежистость заготовки, допускаемая стандартом, может вызывать увеличение в разы мощности фрезерования, характерной для обработки заготовки, не имеющей сбежистости. Это свидетельствует о серьезных трудностях профильного фрезерования отходов лесопиления и необходимости разработки новых технических и технологических решений для реализации процесса обработки на высоких режимах резания. Результаты проведенных теоретических исследований и моделирования мощности резания при профильном фрезеровании древесины проверены экспериментально. Профильное фрезерование древесины выполняли на спроектированном и изготовленном станке ПФП-100 [6, 7]. В качестве заготовок при проведении экспериментов использовали периферийные сегменты хвойных пород естественной влажности. Скорость резания 45 м/с, скорость продольной подачи 2,5; 5,0; 7,5; 10,0 м/мин; припуск на обработку 10...20 мм, сучковатость – один – три сучка на метр длины заготовки. Фрезерование неокоренной поверхности периферийного сегмента проводили при снятых дисковых пилах, предназначенных для обрезки боковых кромок. Для обработки использовали сборную фрезу с механическим креплением ножей из быстрорежущей стали Р6М5 с углом наклона 0 режущих лезвий к оси вращения инструмента, заточенных по дуге окружности радиусом . Максимальный диаметр 180 мм, минимальный диаметр 130 мм, высота фрезы 110 мм. В процессе проведения опытов измеряли абсолютное значение и скорость изменения мощности фрезерования по формуле: , (26) где – изменение мощности фрезерования, кВт; – время между двумя измерениями, с; U_f – фазное напряжение (220 В); – параметр электродвигателя, отражающий отношение в обмотках активных и реактивных токов; – к. п. д. электродвигателя привода фрезы; – изменение силы тока, потребляемого электродвигателем привода главного движения. Результаты экспериментов показали, что процесс профильного фрезерования периферийных сегментов протекает удовлетворительно при малых скоростях подачи заготовки 7 м/мин, а при более высоких подачах наблюдался повышенный уровень вибрации элементов

технологической системы и ухудшение качественных показателей обработанных поверхностей. Удовлетворительная сходимость теории и практики наблюдалась при скоростях подачи 7 м/мин. Сравнение результатов расчетов и экспериментов для более высоких скоростей подачи заготовок не представилось возможным из-за нестабильного протекания процесса профильного фрезерования периферийных сегментов, что объясняется их неоднородными свойствами, сучковатостью и сбежистостью обрабатываемой неокоренной поверхности. Эксперименты показали также, что для реализации производительного процесса профильного фрезерования периферийных сегментов, необходима разработка новых технических решений, например, оснащение станка для профильного фрезерования отходов лесопиления системой управления мощностью фрезерования.