

**СИЛОВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ  
ДРЕВЕСНОСТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ ОСЦИЛЛИРУЮЩИМ  
КОНЦЕВЫМ ФРЕЗЕРНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ**  
*POWER DATES OF PROCESS OF MACHINING OF THE PLANE  
WOOD-BASE MATERIALS BY MEANS OF THE VIBRATING END  
MILLING INSTRUMENT*

Рассмотрим режущий элемент вращающейся с окружной скоростью  $V_o$  концевой фрезы, который совершает одновременно еще два независимых движения - движение подачи со скоростью  $U$  и возвратно-поступательное движение вдоль режущей кромки со скоростью  $V_{os}$  – скоростью осцилляции. На рисунке 1 показан резец в момент его движения вверх.

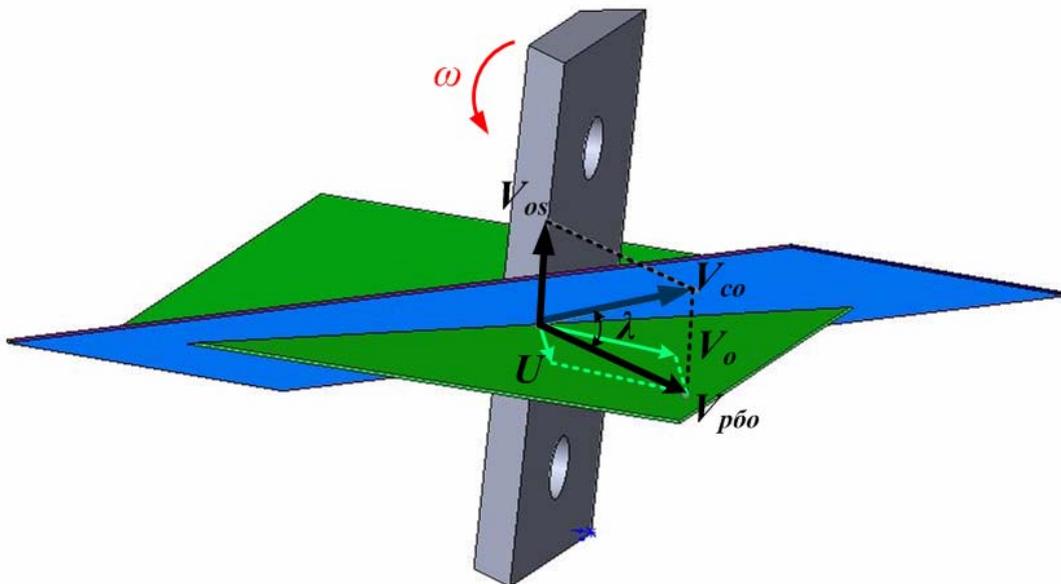


Рисунок 1 – Составляющие вектора результирующего движения осциллирующего резца концевой фрезы

Вектора скорости резания без осцилляции  $V_{rho_o}$  и скорости осцилляции  $V_{os}$  расположены в вертикальной плоскости под углом движения  $\lambda$  друг к другу.

Векторная сумма окружной скорости и скорости подачи определяет скорость резания  $V_{rho_o}$  при классической обработке без протягивания режущей кромки. При этом происходит трансформация угловых характеристик резца, замеренных в статической системе координат (без учета параметров главного движения и движения подачи) в горизонтальной плоскости на величину динамического угла  $\mu$ , то есть в процессе движения концевой фрезы со скоростью  $V_{rho_o}$  появляются кинематические углы резца, отличные от замеренных в статике ( $\alpha_n, \gamma_n$ ): задний  $\alpha_k = \alpha_n - \mu$ , передний  $\gamma_k = \gamma_n + \mu$ , угол резания  $\delta_k = \alpha_k + \beta_k$  [1].

Зададим концевой фрезе перемещения в вертикальной плоскости по гармоническому закону:

$$z = z_{os} \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad (1)$$

где  $z$  – текущая координата точки лезвия осциллирующей концевой фрезы, мм;  
 $z_{os}$  – амплитуда осцилляции концевой фрезы, мм;  
 $\omega$  – циклическая скорость,  $c^{-1}$ ;  
 $t$  – момент времени, с.

Из рисунка 1 видно, что

$$\cos \lambda_k = \frac{V_{p\delta o}}{V_{pco}} = \frac{V_{p\delta o}}{\sqrt{V_{np}^2 + V_{p\delta o}^2}} \quad (2)$$

Для горизонтальной плоскости по теореме синусов:

$$V_{p\delta o} = \frac{U \cdot \sin \varphi}{\sin \mu} \quad (3)$$

Величина динамического угла  $\mu$ , соответствующая углу поворота концевой фрезы  $\varphi$ :

$$\mu = \arctg \left( \frac{U \cdot \sin \varphi}{V_{ок} + U \cdot \cos \varphi} \right) \quad (4)$$

Анализируя уравнение (4), устанавливаем, что углам поворота  $\varphi=0$  и  $\varphi=180^\circ$  соответствует наименьшее значение динамического угла  $\mu_{\min}=0$ , а максимальное значение динамический угол  $\mu$  достигает при  $\varphi = 90^\circ$ :

$$\mu_{\max} = \arctg \left( \frac{U}{V_{ок}} \right).$$

Среднее за оборот концевой фрезы значение динамического угла:

$$\mu_{cp} = \left( \int_{\varphi=0}^{\varphi=\frac{\pi}{2}} \arctg \left( \frac{U \cdot \sin \varphi}{V_{ок} + U \cdot \cos \varphi} \right) \right) / \frac{\pi}{2} = \arctg \left( \frac{2 \cdot U}{\pi \cdot V_{ок}} \right). \quad (5)$$

Скорость осцилляции вдоль режущей кромки в момент времени  $t$ :

$$V_{os} = \frac{dz}{dt} = z_{os} \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (6)$$

Анализируя уравнение, устанавливаем, что в момент времени  $t=0$ ,  $V_{os}=0$ , а максимальное значение скорость осцилляции  $V_{os}=z_{os} \cdot \omega$  приобретает в момент времени  $t = T_{ц}/4$ .

Средняя за время цикла  $T_{ц}=2 \cdot \pi$  скорость осцилляции концевой фрезы:

$$V_{os} = \frac{4 \cdot z_{os} \cdot \omega}{T_{ц}} = \frac{z_{os} \cdot N}{15}, \quad (7)$$

где  $N$  – число двойных ходов концевой фрезы в минуту, дв. х/мин.

В общем виде:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \lambda &= \frac{V_{os} \cdot \sin(\varphi - \mu)}{V_{ок} \cdot \sin \varphi}; \\ \operatorname{tg} \lambda &= \frac{z \cdot \omega_{os} \cdot \sin(\omega_{os} \cdot t) \cdot \sin(\varphi - \arctg(\frac{U \cdot \sin \varphi}{V_{ок} + U \cdot \cos \varphi}))}{V_{ок} \cdot \sin \varphi}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\omega_{os}$  - циклическая частота осцилляции концевой фрезы.

Выражение для определения мгновенной величины динамического угла  $\lambda$ :

$$\lambda = \arctg \left[ \frac{z \cdot \omega_{os} \cdot \sin(\omega_{os} \cdot t) \cdot \sin(\varphi - \arctg(\frac{U \cdot \sin \varphi}{V_{ок} + U \cdot \cos \varphi})}{V_{ок} \cdot \sin \varphi} \right]. \quad (9)$$

Или, через значения числа двойных ходов инструмента в минуту  $N$  (дв.х/мин) и частоты его вращения  $n$  (мин<sup>-1</sup>):

$$\lambda = \arctg \left[ \frac{\pi \cdot z \cdot N \cdot \sin(\frac{N}{n} \cdot \varphi) \cdot \sin(\varphi - \arctg(\frac{U \cdot \sin \varphi}{60 \cdot (V_{ок} + U \cdot \cos \varphi)})}{30 \cdot V_{ок} \cdot \sin \varphi} \right]. \quad (10)$$

Введем кинематическую систему координат, ориентированную относительно направления скорости резания без осцилляции (рис. 2).

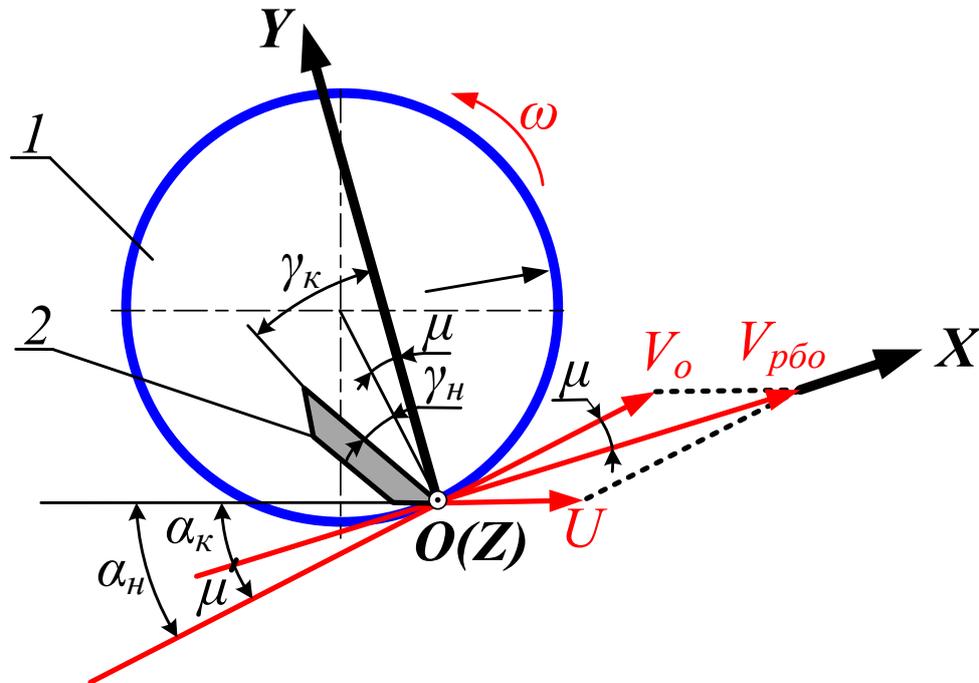


Рисунок 2 – Схема векторов скоростей вращающейся концевой фрезы

На рисунке 3 представлена схема сил, действующих на грани осциллирующего лезвия в процессе резания (проекция на горизонтальную плоскость проекций XY).

Согласно рис. 3, рассматривая силы трения по передней и задней граням лезвия в плоскости движения [2], записываем суммы проекций сил на оси координат.

$$\begin{aligned} \sum F_x = -F_K = F_{3x} - F_{тр.3x} - F_{тр.пх} - F_{пх} = F_3 \cdot \sin \alpha_K - F_3 \cdot \mu_{тр} \cdot \cos \alpha_\phi \cdot \cos \lambda - \\ - F_{II} \cdot \mu_{тр} \cdot \sin \gamma_\phi \cdot \cos \lambda - F_{II} \cdot \cos \gamma_K, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Sigma F_y &= F_{zy} + F_{тр.зу} + F_{тр.пу} - F_{пу} = F_3 \cdot \cos \alpha_k + F_3 \cdot \mu_{тр} \cdot \sin \alpha_\phi \cdot \cos \lambda + \\ &+ F_\Pi \cdot \mu_{тр} \cdot \sin \gamma_\phi \cdot \cos \lambda - F_\Pi \cdot \sin \gamma_k, \\ \Sigma F_z &= F_{тр.з} \cdot \sin \lambda + F_{тр.п} \cdot \sin \lambda = (F_3 \cdot \mu_{трз} + F_\Pi \cdot \mu_{трп}) \cdot \sin \lambda, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\alpha_\phi$ ,  $\gamma_\phi$  – значения соответственно заднего и переднего углов лезвия относительно кинематической системы координат.

На рисунке 4 представлена трансформация угла резания в процессе осцилляции резца.

Из рисунка 4 видно, что  $\delta_\phi = \arctg(\operatorname{tg} \delta_k \cdot \cos \lambda)$ .

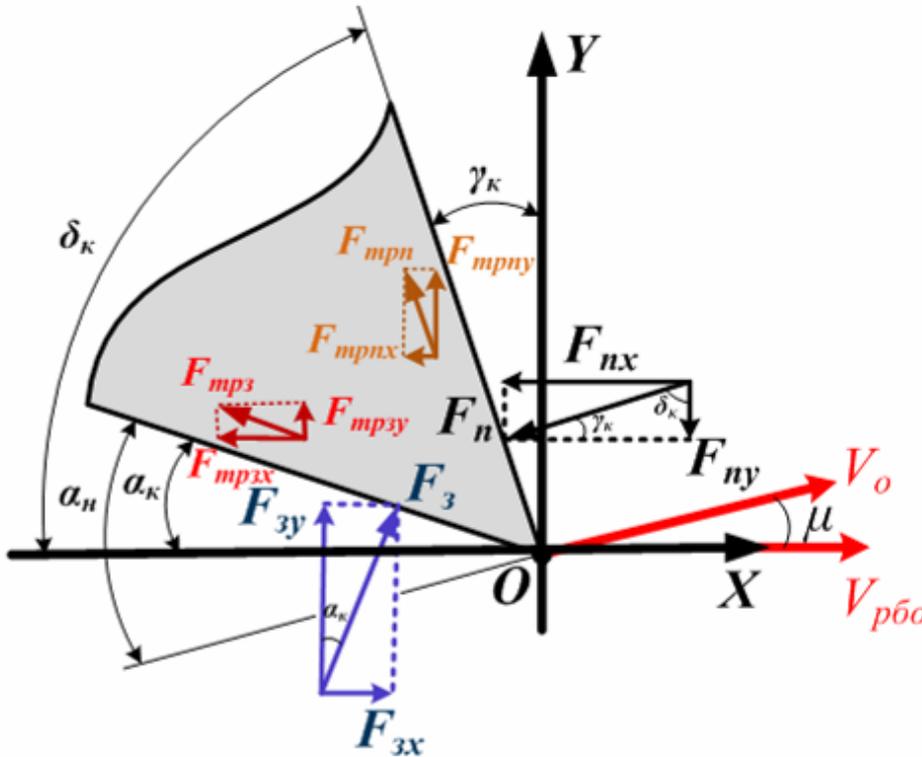


Рисунок 3 – Схема сил, действующих на грани осциллирующего лезвия в процессе резания

Аналогично, для заднего и переднего углов лезвия:

$$\alpha_\phi = \arctg(\operatorname{tg} \alpha_k \cdot \cos \lambda) = \arctg(\operatorname{tg}(\alpha_n - \mu) \cdot \cos \lambda),$$

$$\gamma_\phi = \arctg\left(\frac{\operatorname{tg} \gamma_k}{\cos \lambda}\right) = \arctg\left(\frac{\operatorname{tg}(\gamma_n + \mu)}{\cos \lambda}\right), \quad (12)$$

Из уравнений (11) видно, что наложение на классическую схему обработки концевым фрезерным инструментом дополнительного возвратно-поступательного движения вдоль лезвия обеспечивает сокращение касательной и радиальной составляющих усилия резания, что нашло экспериментальное подтверждение, при обработке ДСтП и фанеры.

Помимо выводов, сделанных по уравнениям (11), достоинства резания концевыми фрезами с осцилляцией подчеркивает рассмотрение процесса внедрения (проникновения) лезвия концевой фрезы в ДСтП.

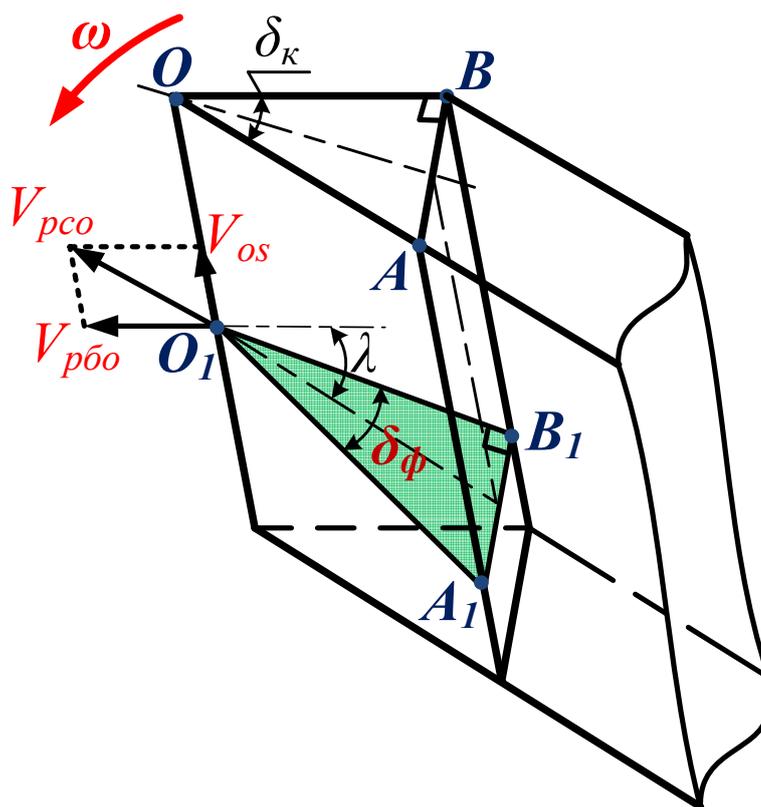


Рисунок 4 – Трансформация угла резания осциллирующего резца

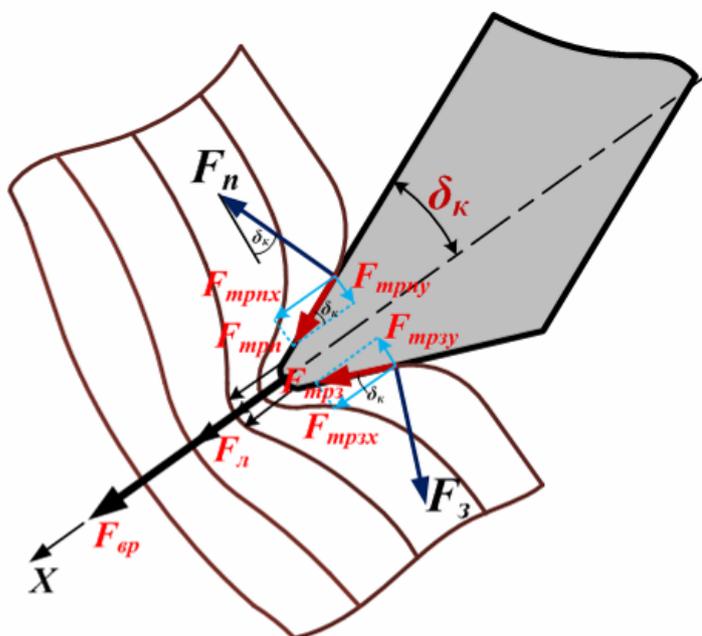


Рисунок 5 – Схема сил, действующих на лезвие концевой фрезы в процессе ее врезание в ДСтП

В связи с тем, что обработка концевыми фрезами характеризуется малыми скоростями резания, а так же предельностью остроты режущей кромки и структурной неоднородностью, пористостью ДСтП, в процессе резания волокна древесины (древесные частицы) не испытывают достаточного подпора, отгибаются, сминаются, далее начи-

нают контактировать с гранями лезвия, отгибаются и сминаются еще в большей степени. Перерезание волокон происходит после создания достаточного подпора.

На рисунке 5 представлена схема сил, действующих на лезвие концевой фрезы в процессе ее проникания в ДСтП.

Согласно рис. 5 усилие, необходимое для врезание в материал резца концевой фрезы при классической схеме обработки:

$$\begin{aligned} F_{вр} &= \sum F_x = F_{л} + F_{пх} + F_{зх} + F_{трпх} + F_{трзх} = \\ &= F_{л} + 2 \cdot F_{п} \cdot (\mu_{тр} \cdot \cos \delta_k + \sin \delta_k). \end{aligned} \quad (13)$$

На рисунке 6 представлена схема сил, действующих на обрабатываемый материал со стороны проникающего в него лезвия осциллирующей концевой фрезы.

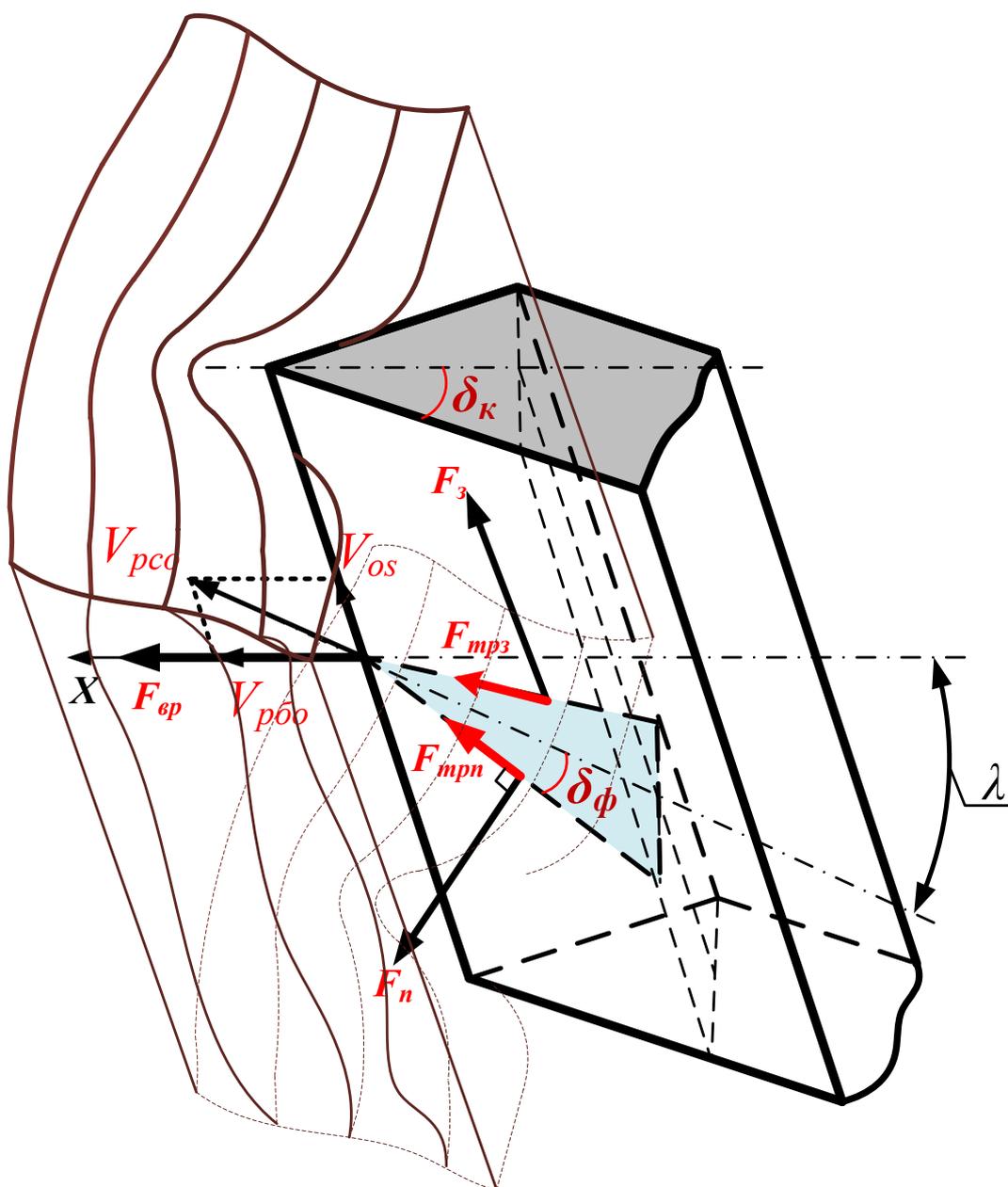


Рисунок 6 – Схема сил, действующих на обрабатываемый материал со стороны проникающего в него лезвия осциллирующей концевой фрезы

Согласно рис. 6 усилие, необходимое для врезание в материал резца осциллирующей концевой фрезы:

$$F_{вр} = F_{л} + 2 \cdot F_{п} \cdot (\mu_{тр} \cdot \cos \delta_{ф} \cdot \sin \lambda + \sin \delta_{к}). \quad (14)$$

Таким образом, можем сделать вывод о том, что горизонтальная составляющая усилия внедрения лезвия осциллирующей концевой фрезы в ДСтП уменьшается в связи с уменьшением горизонтальной составляющей силы трения поверхностей лезвия об обрабатываемый материал. При этом требуемое для разрушения волокон напряженное состояние достигается при меньших значениях внедрения лезвия в материал и силы резания.

Кроме вышеуказанного следует учитывать и наличие неровностей на режущей кромке, которые в процессе осциллирующих перемещений концевой фрезы обеспечивают эффект «подпиливания», что также сокращает усилие резания.

Согласно экспериментальным исследованиям, резание с осцилляцией концевой фрезерного инструмента сокращает энергозатраты на обработку ДСтП [5]. При этом повышается стойкость режущих элементов и полнота их использования.

## Библиографический список

1. Ящерицын, П. И. Теория резания: учеб. / П. И. Ящерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – Мн.: Новое знание, 2005. – 512 с.
2. Бершадский, А. Л. Резание древесины / А. Л. Бершадский, Н. И. Цветкова. – Минск: Выш. школа, 1975. – 304 с.
3. Рудак, П. В. Силовые показатели процесса обработки плитных древесных материалов концевым фрезерным инструментом / П. В. Рудак // Труды БГТУ. Сер. II. Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2009. – Вып. XVII.

**Сафонов А.О.** (ВГЛТА, г. Воронеж, РФ) [safonov-dekan@yandex.ru](mailto:safonov-dekan@yandex.ru)

## **ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ АДАПТИРУЕМЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ УСТАНОВКАМИ ДЛЯ ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ ENERGY SAVING ADAPTIVE SYSTEM IN MANAGEMENT OF PLANT EQUIPMENT FOR HEATING PROCESS OF WOOD MATERIALS**

Создана энергосберегающая адаптируемая система многокритериального управления промышленными установками для тепловой обработки древесных и других дисперсных материалов, которая предусматривает контроль, регистрацию и управление всеми технологическими параметрами с помощью компьютера.

В качестве приборов контроля и регулирования в системе предусмотрен соответствующий комплекс средств автоматизации. Обозначение средств автоматизации в разработанной схеме и их наименование представлено в таблице 1.