

## БЕСЕДА ПРОФЕССОРА А.Л.БЕРШАДСКОГО ПО РЕЗАНИЮ ДРЕВЕСИНЫ

Статья подготовлена профессором В.К. Пашковым по материалам переписки с молодыми учеными кафедры станков и инструментов (1972 год). Содержание работы и структура сохранены по тексту автора. В 2015 году одному из основоположников науки резания древесины А. Л. Бершадскому исполняется 120 лет со дня рождения.

Дорогие товарищи!

Направляя вам эту краткую беседу, жду вашего отзыва и соображения о желании переиздания «Р.Р.» 1967 г. с учетом этой беседы и ваших замечаний.

Мне 87-й год и я объективно с громадной благодарностью восприму все ваши замечания и пожелания.

Хочется попросту побеседовать с вами о резании древесины без тонких теорий (где тонко там и рвется).

За проход реза  $\frac{l, \text{мм}}{1000}$  отделяется стружка и производится работа. Обозначая силу, действующую на зуб на пути прохода  $\frac{l, \text{мм}}{1000}$  и через  $P_{\text{зуб}}$ , кгс, получаем работу в кгс·м за

проход одного реза 
$$A_{\text{зуб}} = P_{\text{зуб}} \cdot \frac{l}{1000}.$$

При числе зубьев, врезающихся за оборот  $z_{\text{об}}$  работа за оборот 
$$A_{\text{зуб}} = P_{\text{зуб}} \cdot \frac{l}{1000} \cdot z_{\text{об}}, \text{ кгс} \cdot \text{м},$$
 а при  $n$ , об/мин мощность будет

$$N = \frac{P_{\text{зуб}} \cdot l \cdot z_{\text{об}} \cdot n}{6,12 \cdot 10^6}, \text{ кВт.} \quad (1)$$

При фрезеровании и продольном пилении круглыми пилами,  $l \cdot e_{\text{ср}} = ch$ ,

где  $c$  – подача на резец,

$e = c \cdot \sin \theta_{\text{ср}}$  – толщина стружки, откуда

$$l = \frac{h}{\sin \theta_{\text{ср}}}. \quad (2)$$

При фрезеровании значение  $\sin \theta_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{h}{D}}$ , пиления круглыми пилами (3)

$$\sin \theta_{\text{ср}} = \frac{57}{R \left[ \arcsin \left( \frac{e+h}{R} \right) - \arcsin \left( \frac{a}{R} \right) \right]}. \quad (4)$$

где  $a$  – подъем стола над центром вала.

При пилении рамными и ленточными пилами  $\sin \theta_{\text{ср}} = \sin 90^\circ = 1$ ,  $l=h$ .

Для фрез, круглых и ленточных пил  $z_{\text{об}} = \frac{\pi D}{t}$ , (5)

Для лесопильных рам, где за оборот врезаются зубья только за рабочий ход

$$z_{\text{об}} = \frac{H}{t}. \quad (6)$$

Для фрез, круглых и ленточных пил

$$N = \frac{P_{\text{ср}} \cdot U_{\text{ср}}}{102}, \text{ кВт, } U_{\text{ср}} = \frac{\pi D n}{6 \cdot 10^4}, \text{ м/с} \quad (7)$$

Для лесопильных рам  $U_{\text{ср}} = \frac{2Hn}{6 \cdot 10^4}, \text{ м/с.} \quad (8)$

Сопоставляя формулы (1), (7) и (8), получим для фрез и круглых пил

$$\mathcal{P}_{\text{ср}} = \mathcal{P}_{\text{зуб}} \frac{l}{t} = \mathcal{P}_{\text{зуб}} \frac{h}{\sin\theta \cdot t}, \quad (9)$$

$$\text{для ленточных пил } \mathcal{P}_{\text{ср}} = \mathcal{P}_{\text{зуб}} \frac{h}{t}, \quad (10)$$

$$\text{для лесопильных рам } \mathcal{P}_{\text{ср}} = \mathcal{P}_{\text{зуб}} \frac{l}{2t}, \quad (11)$$

Следовательно, зная  $\mathcal{P}_{\text{зуб}}$  находим  $\mathcal{P}_{\text{ср}}$ , а зная  $\mathcal{P}_{\text{ср}}$  определим  $N = \frac{\mathcal{P}_{\text{ср}} \cdot U_{\text{ср}}}{102}$ , кВт.

## ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ГИПОТЕЗЫ ДЛЯ РАСЧЕТА $\mathcal{P}_{\text{зуб}}$

(Сокращая изложение я ссылаюсь на книги «Резание древесины» 1956 г. (Р. Д.) и «Расчет режимов резания древесины» 1967 г. (Р. Р)).

При проникновении резца в древесину физика устанавливает, что на острие возникает разрыв непрерывности в воздействии граней резца, сжимающих древесину.

У лезвия создается концентрация напряжений, достигающих значительной величины, обуславливающей переход частиц (молекул) древесины из внутреннего равновесного состояния на прилегающие к ним будущие новые поверхности: стружки и поверхности резания (диспергирование).

Работа диспергирования, по сравнению с работой, затрачиваемой на деформирование древесины и работу трения по граням резца, принимается равной нулю, в связи с микроперемещением частиц.

Условия работы передней грани, отжимающей стружку от поверхности резания, отличны от работы задней грани, поджимающей древесину от поверхности резания под себя. Общее в них то, что производимое ими сжатие древесины не свободное – оно происходит в полузамкнутом объеме.

Опыты профессора Ивановского Е. Г. (ЛЛТА) и доц. Микулинского В. И. (БЛТИ) показали, что при сжатии древесины в замкнутом пространстве (стальной обойме), объем ее уменьшается при постоянном давлении до тех пор, пока объемный вес ее не приблизится к значению близкому к объемному весу древесинного вещества ( $\sim 1,51 \frac{\text{гс}}{\text{см}^3}$ ).

При достижении объемного веса ( $\sim 1,3 \frac{\text{гс}}{\text{см}^3}$ ) дальнейшее изменение объема вызывает значительный рост давления. Древесина, не обладающая сплошностью структуры, приобретает, почти сплошную структуру и, если разнять пуансоны, из стальной обоймы выпадет твердый, как металл цилиндр.

Однако стружка никогда до такого состояния не сжимается, а поэтому правомерна гипотеза образования стружки при постоянном давлении.

## ОПЫТНОЕ УТВЕРЖДЕНИЕ ГИПОТЕЗЫ

Многочисленные опыты, начиная с 1870 г., то есть с опытов профессора Тиме И.А. устанавливают эту закономерность. Тиме наблюдал эту закономерность при строгании древесины, где он установил (визуально) рост силы резания по наклонной восходящей прямой по мере продвижения резца до момента отделения элемента стружки. Но так как по такому же закону растет сила резания по передней грани резца, то, следовательно, давление резания  $\bar{K}, \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2} = \text{Const}$  на поперечном сечении стружки  $e$ , равно  $1 \text{ мм}^2$ . То есть по Тиме  $\mathcal{P}_{\text{рез}} = \bar{K} \cdot e$  и при  $e = 0$   $\mathcal{P}_{\text{рез}} = 0$ , что не отражает реальный процесс резания реальным резцом с радиусом закругления лезвия  $\rho$ , когда на величину  $\rho$  резец утоплен ниже плоскости резания. На сечение  $\rho$  в  $1 \text{ мм}^2$  действует сила  $\mathcal{P}_\rho = \bar{K}_\rho \cdot \rho$ , где

$K_p = \text{Const}$  при данном  $\rho$  по закону постоянства давления в полужамкнутом пространстве. Следовательно  $\mathcal{P}_{\text{рез}} = \mathcal{P}_z + \mathcal{P}_n = K_p \cdot \rho + \bar{K} \cdot e$ , то есть  $\mathcal{P}_z = f(\rho)$ , а  $\mathcal{P}_n = f(e)$  и при  $e=0$   $\mathcal{P}_{\text{рез}} = K_p \cdot \rho$ , а не равно нулю.

Зависимость  $\mathcal{P}_{\text{рез}} = \mathcal{P}_z + \bar{K} \cdot e$  при данном  $\rho$  есть уравнение прямой. Однако это справедливо для  $e > 0,1$  мм так как по мере уменьшения  $e_\mu < 0,1$  мм начинает ощутимо сказываться постоянно действующая часть закругления лезвия у передней грани над плоскостью резания (рис. 35 Р. Р.). Здесь угол резания ( $\delta_p$ )  $< \delta$  то есть меняется и  $\delta_p$  и  $e_\mu$ . При  $e_\mu < 0,1$  мм закон изменения опытной (реальной) силы резания происходит по ниспадающей параболической кривой до  $\mathcal{P}_z = \bar{K}_p \cdot \rho$ .

Надо помнить, (Рис 34. Р. Р.), что фактическая сила отсчитывается от линии раздела 00. По опытам  $\mathcal{P}_z = (a_p - 0,8)$ , а  $\mathcal{P}_n = 0,8p + \bar{K} \cdot e$ , где  $\mathcal{P}_z, \mathcal{P}_n$  – фактические силы, а  $p$  и  $\bar{K} \cdot e$  – фиктивные силы /см. рис. 34 Р. Р./.

Закон постоянства давления подтверждается опытами Золотарева /СИБЛТИ/, а также при срезе сучьев опытами Нестеренко /УЛТИ/, Захаренко /ЛЛТА/, Кириллова /ЦНИИМЭ/, Шепилина /ЦНИИМЭ/, где даны осциллограммы роста  $P_{\text{рез}}$  по закону прямой. Это утверждает принятую гипотезу постоянства давления при резании. Также устанавливается закон независимости сил, действующих по обе стороны от плоскости резания, где на лезвии резца происходит разрыв непрерывности действия граней резца на древесину.

Изложенное есть та физическая основа на который построен расчетный метод режимов резания древесины / См. Р. Р. §§ 14, 15, 16, 17 и 18/.

Все изложенное не эмпирическая случайность, а физическая закономерность, достаточно обоснованная обработкой многочисленных опытов за последние четыре десятилетия и в последние годы подтвержденная в диссертациях В. Морозова /МЛТИ/, В. Чуприна /Каунасский Политехнический Институт/, Л. Клубкова /БТИ/, А. Санюковича /БТИ/, А. Векшина /НИИДРЕВ/.

В науке нет конечной точки и все решенное – глубокая, но далеко не полная разведка, которая должна быть продолжена.

Приведенное краткое упрощенное изложение основа – основ физики резания. Оно позволяет перейти к расчетам  $N$  и  $\mathcal{P}_{\text{ср}}$  минуя формальное условное понятие удельной работы

$$K, \frac{\text{кгс} \cdot \text{м}}{\text{см}^3} = \frac{\text{Работа резания}}{\text{Объем номинальной стружки}}$$

Но ведь работа резания совершается над плоскостью резания, завися от объема номинальной стружки и под плоскостью резания, где деформируется объем древесины, отличный от объема номинальной стружки /Рис. 17 стр. 23 Р. Р./.

Эти объемы деформируются по разному и требуют разную затрату работы, которую удалось экспериментально выявить только после расчленения  $\mathcal{P}_{\text{рез}}$  на  $\mathcal{P}_z$  и  $\mathcal{P}_n$  методами изложенными в «Р. Р.» - 1967 г. и ранее 1962г в «Справочнике по расчету режимов резания». Теоретически расчленение работы резания на составные части дано впервые одновременно проф. А. Дешевым и мною в период 1930-34 г.

Относя в прошлом интегрально определенную работу резания к объему номинальной стружки, мы обезличивали роль работы задней грани резца.

В дальнейшем при расчленении  $\mathcal{P}_{\text{рез}}$  определение удельной работы резания (численно совпадающей со средним давлением по ф. (122) Р. Р. стр. 80) – формальное  $K = \bar{k} + \frac{p}{e}$ .

По опытам  $p$  от  $e$  не зависит, а потому деление на  $e$  зависимости  $\mathcal{P}_{рез} = p + \bar{k}e$  – формальное действие, физически ничем не оправданное.

Понятие  $\mathcal{P}_{зуб}$  физически обосновывается всеми экспериментальными данными, изложенными в Р. Р., которые повторно не излагаю, а только даю ход расчета по  $\mathcal{P}_{зуб}$  что проще и физически оправдано.

Умножая ф. 137 и ф. 138 на стр. 83 «Р. Р.» на  $b$  и  $e$  получим силы:

$$\mathcal{P}_{зуб} = a_p \cdot p \cdot b_s + c \cdot \sin\theta \cdot (\bar{K} \cdot e + \alpha h) \text{ при } c \cdot \sin\theta > 0,1 \text{ мм} \quad (12)$$

$$\mathcal{P}_{зуб} = (a_p - 0,8) \cdot p \cdot b_s + c \cdot \sin\theta \cdot (K_\mu \cdot e + \alpha h) \text{ при } c \cdot \sin\theta < 0,1 \text{ мм} \quad (13)$$

где  $b_s = "S"$  при разводе и " $b_s$ " – ширина пропила при плющении и фрезеровании.

### ХОД РАСЧЕТА $N$ И $\mathcal{P}_{ср}$ (ПРЯМАЯ ЗАДАЧА)

#### И $U$ И $\nabla\partial$ (ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА)

Кроме  $N$  и  $\mathcal{P}_{ср}$  надо еще определить усилие подачи  $Q_{ср}$  – по направлению подачи и  $S \perp Q_{ср}$  по формулам

$$Q_{ср} = \mathcal{P}_{ср} \cdot \cos\theta_{ср} + R_{ср} \cdot \sin\theta_{ср}, \quad (14)$$

$$S_{ср} = \mathcal{P}_{ср} \sin Q_{ср} - R_{ср} \cos Q_{ср}, \quad (15)$$

где  $R_{ср}$  – радиальная сила. По опытам В. Чуприна, В. Морозова определяется из выражения

$$R_{ср} \approx \frac{0,5 \cdot a_p^2}{a_p} = \frac{0,8}{p \frac{l}{t}} - \mathcal{P}_{н ср} \cdot \operatorname{tg}(90 - \delta - \varphi) \quad (16)$$

где  $\angle\varphi = 15^\circ$  – угол трения по передней грани по опытам А. Клубкова и А. Сенковича.

Средние силы на резание на зубе определяются по формулам

$$\mathcal{P}_{з ср} = (a_p - 0,8) p \frac{l}{t} \quad (17)$$

$$\mathcal{P}_{н ср} = \mathcal{P}_{ср} - \mathcal{P}_{з ср} \quad (18)$$

Сами формулы 12 и 13 указывают на порядок расчета.

1. Определяем  $\theta$ ,  $\sin\theta$ ,  $\cos\theta$  по ф. (3), (4).

2. Определяем  $C = \frac{1000 \cdot U}{z \cdot n}$ , где  $z$  вычисляется по формулам (5), (6).

3. Если  $C \cdot \sin\theta > 0,1$  мм применять формулу 12.

Если  $C \cdot \sin\theta < 0,1$  мм применять формулу 13.

4.  $a_p = 1 + 0,2 \frac{\Delta\rho}{\rho_0}$ , где  $\rho_0 = 5$  мкм при фрезеровании и  $\rho_0 = 10$  мкм при пилениях, а

$$\Delta_s = \xi \frac{\ln T}{1000}. \quad (16)$$

Приращение радиуса затупления  $\xi$  в мкм на метр принимается равным:

$$\xi = 0,0008 \frac{\text{МКМ}}{\text{М}} \text{ при фрезеровании,} \quad \xi = 0,001 \frac{\text{МКМ}}{\text{М}} \text{ при пилениях,}$$

$$\xi = 0,001 \frac{\text{МКМ}}{\text{М}} \text{ при пилениях рамными пилами.}$$

Значение  $\xi$  для сосны, а для дуба на 30 % больше.

Длина стружки  $l$  определяется по формуле (2).  $T$  – заданное время резания в мин. Формула 16 применяется, когда цикл затупления зуба равен 1 обороту.

Для ленточных пил цикл равен выражению  $1 + \frac{2L}{\pi D}$ ,

где  $L$ , мм – расстояние между центрами шкивов станка,  $D$ , мм диаметры шкивов

5. Зная  $\angle\theta$  определяем  $P$  по «Р. Р.» стр. 86 формула 145 или по номограмме 40 в «Р. Р.» стр. 88.

6. Для пил с разведенным зубом  $\lambda$  ширина пропила  $b = S$ , для плющеного зуба  $b$  и  $\Delta$  при фрезеровании.

7.  $c \cdot \sin\theta_{cp}$  уже известно по пп. 1 и 2.

8. По  $\angle\theta$  определяем  $\bar{K} = A\delta + Bv - B$  или  $K_\mu = A\delta + Bv - B_\mu$  по формулам «Р. Р. – стр. 87 или по номограмме 40 а, б стр. 88.

9. Значения интенсивности трения  $\alpha_\lambda = 0,072 \frac{\text{кг}\cdot\text{с}}{\text{мм}^2}$  круглых пил или  $\alpha_\Delta = 0,058 \frac{\text{кг}\cdot\text{с}}{\text{мм}^2}$  для пил с плющенным зубом, для рамных пил  $\alpha_\lambda = 0,025 \frac{\text{кг}\cdot\text{с}}{\text{мм}^2}$ ,  $\alpha_\Delta = 0,02 \frac{\text{кг}\cdot\text{с}}{\text{мм}^2}$ , при фрезеровании  $\alpha = 0 \frac{\text{кг}\cdot\text{с}}{\text{мм}^2}$ .

Словом все определено,  $\mathcal{P}_{зуб}$  по формулам (12) или (13) определяем

10.  $\mathcal{P}_{cp}$  определяем по формулам (9), (10), (11).

11.  $N = \frac{\mathcal{P}_{cp} \cdot U_{cp}}{102}$ , кВт.

12. По формуле 17 определяем  $\mathcal{P}_{з ср}$  и  $\mathcal{P}_{н ср}$ .

13. По формуле 16 определяем  $R_{cp}$  при  $\varphi = 15^\circ$ .

14. По формуле (14), (15) определяем  $Q$  и  $S$ .

Примечание: Под влиянием  $S$  возникают вредные сопротивления  $Q_1$  – в подаче, зависящие от конструкции механизма подачи, таким образом  $Q_{полн} = Q + Q_1$ .

Обратная задача решается идентично.

Зная  $N$  определяем  $\mathcal{P}_{cp}$ , а по  $\mathcal{P}_{cp}$  определяем  $\mathcal{P}_{зуб}$  и

$$C = \frac{\mathcal{P}_{зуб} - a_s p b_s}{\sin\theta_{cp} [\bar{K}b + \alpha h]} \text{ и } U = \frac{C \cdot z \cdot n}{1000}, \text{ м/мин.}$$

Значения шероховатости  $\Delta d$  определяем по Р. Р. по нормативным опытным таблицам.

#### Дополнение для ясности и упрощения

Уже в «Р. Д.» по стр.16 (сноска внизу) мы встречаемся с определением академика Кузнецова В. Д. («Физика резания»)  $K = \frac{\mathcal{P}_{зуб}}{e \cdot b}$  – «среднее условное напряжения (давление – А. Б.) резания».

Это очень важно – «условное». Достаточно только посмотреть на рентеноснимки «Р. Д.» рис. 13, стр. 27, а так же другие /Р. Д. и Р. Р./, чтобы четко понять, что деформируется древесина над плоскостью резания /в зоне номинальной стружки/ и под плоскостью резания в отличном от номинальной стружки объеме. Следовательно, отнесение работы резания к номинальному объему – условно. И так, - условно и ф. 137 и 138 «Р. Р.» стр. 82 условно.

Но вот  $K \cdot e \cdot b = \mathcal{P}_{зуб}$  – четкая реальная физическая величина.

То есть безусловное выражаем через – условное. Надо помнить, что  $e_\lambda b_S = \frac{b}{S} \cdot C \cdot \sin\theta \cdot S = b \cdot C \cdot \sin\theta$ , а  $e_\Delta \cdot b = b \cdot C \cdot \sin\theta$  и тогда по ф. 137

$$\mathcal{P}_{зуб\lambda} = a_\rho \cdot p \cdot S + C \cdot \sin\theta \cdot (Kb + \alpha_\lambda h)$$

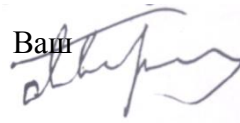
$$\mathcal{P}_{зуб\Delta} = a_\rho \cdot p \cdot b + C \cdot \sin\theta \cdot (Kb + \alpha_\Delta h)$$

и т. д. См «Р. Р.» куда надо внести понятие В. Д. Кузнецова об условности  $K, \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2} = K, \frac{\text{кгс} \cdot \text{м}}{\text{см}^6}$

P.S. Дорогой Валентин Кузьмич!

Я Вас не забываю и очень ценю. Я поздравляю вас и всю кафедру с новым учебным годом и через вас шлю эту беседу. Я хвораю многогранно и непрерывно и выхожу из строя, но борюсь. И эта беседа попытка оживления.

Ваш



А. Бершадский