

*Профессор А. Л. БЕРШАДСКИЙ*

## **ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ОСНОВНЫМИ ФАКТОРАМИ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ РЕЗАНИЕМ И ГРАФИКИ СКОРОСТЕЙ КАК ПАСПОРТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАНКОВ**

Всякий процесс обработки (не считая организационных моментов) определяют три составляющие:

- 1) материал (древесина) — то, что мы обрабатываем,
- 2) инструмент — то, чем мы обрабатываем, и
- 3) станок и осуществляемые им рабочие движения, т. е. те перемещения инструмента в отношении древесины, которые обеспечивают процесс обработки, заключающийся в изменении формы и объема заготовки.

Каждая из трех составляющих процесса обработки включает в себя значительное количество изменяющихся элементов, влияющих на результаты обработки. Сочетание всех трех составляющих в едином неделимом процессе механической обработки древесины, с учетом всех факторов, влияющих на них, предопределяет сложность теоретических обобщений и практических решений.

Грандиозные задачи, стоящие перед лесной промышленностью в соответствии с директивами партии и правительства, можно осилить при помощи науки, способной раскрыть внутренние закономерности развития явлений, происходящих при механической обработке древесины, и управлять этими явлениями.

Начиная с работ основоположника учения о резании проф. И. А. Тиме (1868), решался первоочередной вопрос — о геометрии режущего инструмента. Все первоначальные работы проф. И. Тиме, К. Зворыкина и других решали механикоматематическим методом вопросы, связанные с определением наиболее выгоднейших углов резания в сочетании с силовыми параметрами, действующими на резец.

Главные же факторы производительности — скорость, подача, глубина резания и др., зависящие от физических свойств обрабатываемого материала, от качества резца (температуростойкость и износостойкость) — не изучались.

Современное понимание процесса резания различных материалов как процесса, в котором происходит ряд сложных механических, физических и физико-химических явлений в неотделимой связи и взаимном влиянии друг на друга, выработалось в течение столетия. Основоположителем физического обоснования процесса резания, которое пришло на смену механико-математическим объяснениям, является Я. Г. Усачев (1915). Изучая термодинамические тепловые процессы при резании металлов, исследуя металлографическим методом стружкообразование, Я. Г. Усачев установил неправомочность определения работы реза, исходящего из свойств материала *вне его обработки, т. е. в статике, в холодном состоянии*. Он показал на изменение этих свойств в зависимости от температурно-скоростных факторов. Начиная с работ Я. Г. Усачева, учение о резании все шире и глубже стало развиваться на основах физического и физико-химического обоснования происходящих при стружкоотделении процессов, достигнув сегодня скоростного резания металлов, обоснованного современной школой физико-химиков в лице академиков В. Д. Кузнецова (физика твердого тела, физика резания металлов), П. А. Ребиндера (физико-химические явления износа трущихся поверхностей и смазки при высоких давлениях) и др.

Неотложная задача творческих инженерных работников — физически осмыслить процессы для возможности создания новых конструкций станков и инструментов, обеспечивающих максимальную производительность и наивысшее качество обработки. Однако современное древоисследование, к сожалению, не создало основ для развития физической теории резания. Неудовлетворительны также попытки создания учения о резании на базе сопротивления материалов с применением временных сопротивлений древесины разрушению. Эти попытки не имеют под собой физически обоснованной базы.

Напряжения разрушения, определенные в процессах при сжатии образцов при малых скоростях нагружения, неидентичны с напряжениями, которые должны иметь место при больших скоростях резания. Помимо того, при сжатии образца в прессе нет образования новой поверхности, что, наоборот, характерно для процесса резания. Оба процесса не подобны, так как, помимо всего, в процессе резания возникает процесс прессования древесины в полужамкнутом пространстве.

Остановимся на рассмотрении опытов, проведенных кандидатом технических наук А. Т. Вагиным (АН БССР) в 1951—1952 гг. Восприняв методику академиков В. П. Горячкина и В. А. Желиговского, которые определяли работу лезвия реза при скользящем резании технических и зерновых культур, А. Т. Вагин разделал испытуемый образец древесины на пластинки толщиной 0,1 мм. Сложив их в порядке отделения от

образца и огибая вокруг выпуклого шаблона, закрепив концы пучка пластин, он надвигал резец на изогнутый, плотно уложенный пакет. При перерезывании концы отгибались, что приводило к устранению трения перерезанных пластинок древесины о грани резца. Прорезая так пакеты пластинок резцами с разными радиусами затупления вершины резца  $\rho$  (от 0,015 мм до 0,25 мм), нашли среднее давление  $K\rho$ , отнесенное к диаметру затупления  $2\rho$ :  $K\rho = 30,6 \text{ кг/мм}^2$ , что во много раз превышает временное сопротивление древесины на сжатие нормально к волокнам. Эти опыты показывают, что подход к решению вопросов о давлении на резец с мерилем напряжений разрушения древесины, найденных из древесиноведческих опытов в прессах, где сжимались изолированные образцы, не имеют под собой физической основы. Процесс свободного сжатия образца и процесс несвободного сжатия древесины вклинившимся во внутрь ее резцом — разные процессы. Происходящие явления отличны друг от друга. При вклинившемся резце получаем процесс прессования древесины в полузамкнутом пространстве.

Степень прессования древесины обуславливается подпором древесины, лежащей над, перед и под резцом.

Рентгеноснимки, произведенные автором при торцевом резании (рис. 1), а также опыты доцента Золотарева, при которых резец вклинивался в образец с сеткой, нанесенной на боковую поверхность бруска показывают, что сжатие древесины у прирезцовой части значительно. Размер клеток сетки уменьшается в 2 и более раз. Профессор Хухрянский устанавливает на основании своих опытов по прессованию древесины, что в зоне, где происходит первичное деформирование древесины до потери устойчивости клеточками ранней древесины, относительное сжатие достигает 3—6%. Затем давление почти сохраняется постоянным на участке, на котором объем уменьшается до 1,5 раза. Наконец, при достижении такого уменьшения начинается переход явления в третью стадию деформирования толстостенных клеток поздней древесины и дальнейшего сжатия уже уплотненной массы ранней древесины. Давления интенсивно растут при незначительном изменении объема, достигая, по опытам проф. Хухрянского,  $7 \text{ кг/мм}^2$ , т. е. выше временного сопротивления древесины поперечному сжатию. Аналогичную картину установил доц. Е. Г. Ивановский, сжимая в стальной обойме цилиндрические образцы древесины. При его опытах давление достигало  $42 \text{ кг/мм}^2$ , и образец прессовался, изменяясь в объеме до 2—2,5 раза. То же показали опыты, проведенные по линии НСО в БЛТИ.

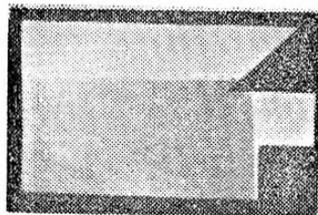


Рис. 1



Двадцатипятилетние обобщения опытов по резанию древесины привели автора к формуле резания, которая в основе своей относится к круглой пиле с разведенными зубьями, как самому общему случаю (рис. 2).

Условимся в дальнейшем обозначать подстрочным знаком  $\lambda$  все величины, относящиеся к разведенным зубьям, и  $\Delta$  — к плющенным зубьям.

Связь между основными факторами процесса резания дается формулой

$$N_{\lambda} = \frac{a_{\rho} \cdot a_{\mu} \cdot a_{\nu} K' b \cdot h (\pi D n)^m U^{1-m}}{6 \cdot 10^{3(1+m)} \left(\frac{b}{S}\right)^m \cdot t^m \cdot S_{in}^m \Theta} + \frac{\alpha_{\lambda} h^2 U}{6 \cdot 10^3}, \quad (1)$$

где:  $N_{\lambda}$  — мощность резания (в *квт*),

$a_{\nu}$  — коэффициент, учитывающий влияние скорости резания  $V$  (в *м/сек*),

$a_{\rho}$  — коэффициент, учитывающий затупление инструмента,

$a_{\mu}$  — коэффициент, учитывающий влажность древесины  $W$  (в %),

$K'$  — удельная работа при толщине стружки  $e=1$  мм при данном угле резания  $\delta$  и динамическом угле встречи  $\psi$ , где под динамическим углом встречи понимается угол между вектором скорости резания  $V$  и направлением волокон,

$b$  — ширина пропила (в *мм*),

$h$  — высота пропила (в *мм*),

$D$  — диаметр окружности резания (в *мм*),

$n$  — число оборотов пильного вала (в *об/мин*),

$U$  — скорость подачи (в *м/мин*),

$S$  — толщина пилы (в *мм*),

$t$  — шаг пилы (в *мм*),

$\Theta$  — кинематический угол встречи, т. е. угол между векторами скорости резания  $V$  и скорости подачи  $U$ . Если вектор скорости подачи  $U$  совпадает с направлением волокон, то  $\angle \Theta = \angle \psi$ .

$\alpha_{\lambda}$  — интенсивность трения и уплотнения стружки в междузубном пространстве (в *кгм/см<sup>3</sup>*),

$m$  — степенной показатель, зависящий от динамического угла встречи  $\psi$  (табл. 1).

Таблица 1

$\psi^0 = 0$	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$m = 0,55$	0,47	0,44	0,42	0,39	0,37	0,36	0,35	0,34	0,33

Значения  $a_{\rho}$  определяются по таблице 2 в зависимости от времени  $T_{\text{час}}$  работы инструмента без переточки.

Таблица 2

$T_{\text{чис}} = 0,$	1	2	3	4
$a_{\rho} = 1$	1,22	1,34	1,4	1,46

Значения  $a_{\rho}$  при динамическом угле встречи  $\psi < 20^{\circ}$  определяются по таблице 3.

Таблица 3

$w^0/v_0 = 10$	15	25	50
$a_{\mu} = 1,05$	1,00	0,95	0,9

При  $\angle \psi > 20^{\circ}$  значение  $a_{\mu}$  определяется по таблице 4.

Таблица 4

$w^0/v_0 = 10$	15	25	50	60	70	90	90
$a_{\mu} = 0,95$	1,0	1,08	1,05	1,08	1,08	1,05	1,0

Удельная работа резания растет (опыты АЛТИ, БЛТИ) с увеличением скоростей резания  $V$ , принятых в практике. Значения  $a_v$  приводятся в таблице 5.

Таблица 5

$V^M/\text{сек} = 1$	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$a_v = 1$	1,1	1,2	1,4	1,45	1,3	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7

Значения углов  $\Theta$  определяются по общеизвестным формулам: при пилении  $\angle \Theta = \arccos \frac{a+h^2}{R}$ ,

где:  $a$ —подъем стола пилы над центром вала (в мм),

$h$ —высота пропила (в мм),

$R$ —радиус окружности резания (в мм),

при фрезеровании  $\angle \Theta = \arcsin \sqrt{\frac{h}{D}}$ ,

$\alpha_{\lambda} = 0,015$  для круглых и ленточных пил,

$\alpha_{\Delta} = 0,012$  " " " " " "

$\alpha_{\lambda} = 0,025$  для рамных пил,

$\alpha_{\Delta} = 0,02$  " " " " " "

Значение  $K'$  (ось ординат) определяется по номограмме (рис. 3) в зависимости от угла  $\psi$  (ось абсцисс) и угла резания  $\delta$ .

Каждому углу резания  $\delta$  отвечает соответствующая наклонная прямая. Способ пользования дан на самой номограмме. На данном рисунке в порядке примера приведена номограмма только для сосны. Аналогичные номограммы имеются для разных пород древесины.

### Номограмма

Способ пользования.

Дано  $\angle \psi = 60^\circ$ ,  $\angle \theta = 60^\circ$

Определить  $K_{н.д.}$

Решение: построяем 1-2  $K_{н.д.} = 2,5 \frac{м.м.}{см.м.}$

(11-1) мм.

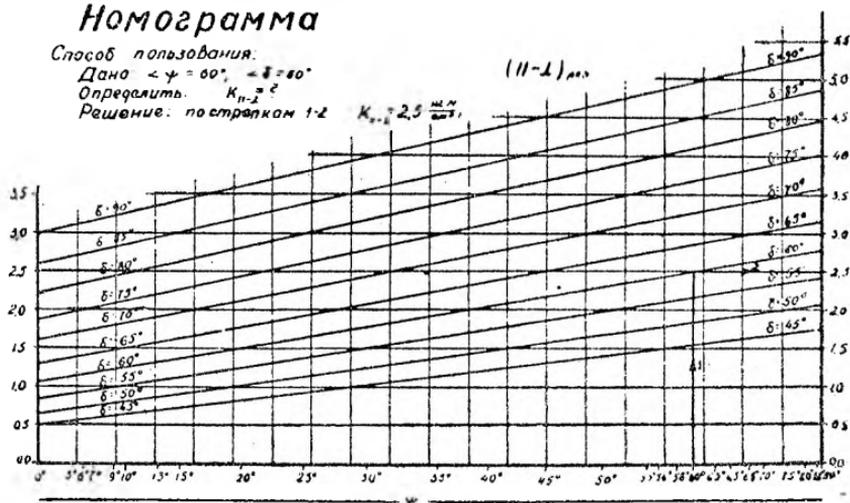


Рис. 3

Формула (1) представляет собою общий случай решения. От этого общего случая легко перейти к другим видам обработок: пиление с плющенными зубьями вместо разведенных, пиление столлярными, ребровыми, ленточными пилами, пиление рамными пилами, строгание, все случаи фрезерования, цепное долбление, т. е. случаи обработок в продольно-торцевом направлении.

Например, при переходе к лесопильным рамам заменяют  $\pi D$  значением хода лесопильной рамы  $H_{М.М.}$ . Значение  $\angle \theta \approx \angle \psi = 90^\circ$ .

Значение  $m=0,33$  (табл. 1). При этих значениях формула получает вид:

$$N_{\lambda} = \frac{a_{\mu} \cdot a_{\rho} \cdot a_{\nu} \cdot K' b \cdot h (H \cdot n)^{0,33} U^{0,67}}{6 \cdot 10^4 \left(\frac{b}{S}\right)^{0,33} 1,033} + \frac{\alpha_{\lambda} \cdot h^2 U}{6 \cdot 10^3} \quad (2)$$

При переходе на плющенные зубья, где ширина пропила и длина лезвия совпадают, отношение ширины пропила  $b$  к ширине лезвия равно единице, и  $\left(\frac{b}{S}\right)^{0,33} = 1$  в знаменателе первого слагаемого. Во втором слагаемом  $\alpha_{\lambda} = 0,025$  заменяется значением  $\alpha_{\Delta} = 0,02$ .

При переходе на фрезерование отпадает второе слагаемое, характеризующее процесс в междузубной впадине;  $\frac{b}{S}$  при фрезеровании равно единице. При этих значениях формула принимает вид:

$$N = \frac{a_p \cdot a_\mu \cdot a_v K' b \cdot h (\pi D n)^m \cdot U^{1-m}}{6 \cdot 10^3 (1+m) t^m \sin^m \Theta} \quad (3)$$

Для каждого конкретного случая обработки значения  $a_v$ ,  $K'$ ,  $m$ ,  $\Theta$  получают свои частные значения, находимые из соответствующих таблиц и номограммы (рис. 3). Изменение одного из факторов режима обработки влияет на соответственные значения коэффициентов и степенных показателей, отражая взаимную комплексную связь всех факторов в процессе обработки. Так, например, изменив подъем стола над центром вала круглой пилы, получим изменение углов  $\Theta$  и  $\psi$ , а в связи с этим и других величин, входящих в формулу (1). Изменение диаметра фрезы повлияет на изменение  $V$ ,  $\angle \Theta$ ,  $\angle \psi$ , а, следовательно, и на все другие показатели и т. д. Для полноты анализов необходимо их вести одновременно по формулам мощности и силы резания

$$P = \frac{102 N}{V}, \quad (4)$$

а для фрезерования еще по фактической силе резания  $P_\Phi$  на дуге врезания  $l$

$$P_\Phi = \frac{\pi D}{Zl} P, \quad (5)$$

где:  $D'$  — диаметр фрезы (в мм),

$l$  — длина дуги врезания,  $l = \sqrt{Dh}$ , где  $h$  — припуск на обработку (в мм), и

$Z$  — число ножей на валу.

Пользуясь этими формулами, легко строим графики скоростей для данного конкретного станка, расчетные номограммы для посылок любых лесорам, обосновывая техническую производительность оборудования.

*Пример анализов при рамной распиловке.*

$$\text{Обозначая } \frac{a_p \cdot a_\mu \cdot a_v K' b \cdot h (Hn)^{0,33}}{6 \cdot 10^3 \left(\frac{b}{S}\right)^{0,33} t^{0,33}} = B_\lambda, \quad (6)$$

$$\frac{a_\lambda \cdot h^2}{6 \cdot 10^3} = A_\lambda, \quad (7)$$

получаем из уравнения (2) при мощности, приходящейся на одну пилу  $N$ ,

$$A_\lambda \cdot x^3 + B_\lambda \cdot x^2 = N, \quad (8)$$

или

$$A_\lambda \cdot x + B_\lambda = y \quad (9)$$

и 
$$\frac{N}{x^2} = y, \quad (10)$$

где  $x = U^{0,33}$ .

Уравнение параболы (10) справедливо для любых лесорам, так как в него не входят параметры лесорамы. Уравнение прямой (9) зависит от параметров лесорамы и режима распиловки. Оно справедливо только для данного случая распиловки.

Построив в прямоугольной системе координат параболы для разных значений  $N$ , т. е. для разного числа пил в поставе, получим расчетный планшет для любых лесорам. Определив для данных условий  $B_\lambda$  по уравнению (6) и  $A_\lambda$  — по уравнению (7), строим прямую  $a_\lambda b_\lambda$ , где  $B_\lambda$  — начальная ордината, а  $A_\lambda = \text{tg} \varphi$ , где  $\varphi$  — угол наклона прямой  $a_\lambda b_\lambda$  к горизонтали. В точке пересечения с параболой, соответствующей данной мощности  $N$ , получаем искомое значение  $U_\lambda$  (рис. 4).

Перейдем от разведенных зубьев к плющенным. При этом  $\left(\frac{b}{s}\right)^{0,33} = 1$ , т. е. уменьшается против разведенных зубьев, а, следовательно  $B_\Delta$  увеличивается против  $B_\lambda$  (рис. 4). Что касается  $A_\Delta$ , то его значение уменьшается, так как по опытам  $\alpha_\Delta = 0,02$ , а  $\alpha_\lambda = 0,025$ .

Найдя новое значение  $A_\Delta$  и соответственно  $\text{tg} \varphi_\Delta$ , где  $\varphi_\Delta < \varphi_\lambda$ , получим, что скорость подачи  $U_\Delta$  уменьшится.

Учитывая большую жесткость рамных пил с плющенными зубьями, уменьшаем на 10% ширину пропила, пропорционально уменьшая  $B_{b\Delta}$  против  $B_\Delta$  и не влияя на  $\angle \varphi_\Delta$ . При этом получим, что посылка  $\Delta_{b\Delta}$  увеличится против  $\Delta_\Delta$ .

Далее усматриваем, что, увеличивая шаг  $t_\Delta$  против  $t_\lambda$ , мы еще больше уменьшаем ординату  $B_{t\Delta}$ , и в результате перейдем к повышенным посылкам при плющенных зубьях. При

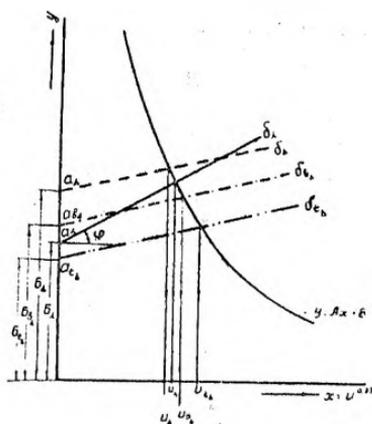


Рис. 4.

повышении мощности на пилу получим, что при тех же условиях, как и при разведенных зубьях, где дальнейшее повышение подачи ограничивалось качеством пропила, можно повысить производительность, если только это позволит емкость впадины.

Пример анализа при распиловке на круглопиловом станке при высотах пропила до 100 мм, где за малостью можно пренебречь вторым слагаемым в формуле (1). При этом условии

$$N_{\lambda} = \frac{a_{\rho} \cdot a_{\mu} \cdot a_{v} \cdot K' \cdot b \cdot h \cdot (\pi D n)^m \cdot U^{1-m}}{6 \cdot 10^{3(1+m)} \left(\frac{b}{S}\right)^m \cdot t^m \cdot \sin^m \theta} \quad (11)$$

$$P_{\lambda} = \frac{102N}{V} = \frac{10^{3(1-m)} a_{\rho} \cdot a_{\mu} \cdot a_{v} \cdot K' \cdot b \cdot h \cdot U^{1-m}}{\left(\frac{b}{S}\right)^m \cdot t^m \cdot \sin^m \theta \cdot (\pi D n)^{1-m}} \quad (12)$$

При данном диаметре пилы  $D$ , увеличивая число оборотов вала  $n$ , получаем, помимо увеличения  $V$ , соответственное увеличение  $a_v$  и, если до этого производительность  $U$  м/мин характеризовалась полным использованием мощности  $N$ , то придется с увеличением  $n$  уменьшить производительность. При ручных подачах усилие станочника снизится (формула 12), так что при резерве мощности производительность повысится. Те же формулы (11, 12) показывают, что с увеличением шага  $t$  снизится как мощность  $N$ , так и усилие резания  $P$ . Еще больше получится эффект, если снизить угол резания  $\delta$ , что снизит  $K'$  (рис. 3).

Таким образом, сознательно оперируя этими факторами, мы можем их привести к таким соотношениям, что при тех же установочных мощностях можно значительно повысить производительность. Эти анализы и были положены в основу модернизации профилей пил и проведения опытных распиловок на комбинатах БССР по внедрению скоростных методов распиловки, повысив производительность на 20%. Эти же опыты позволили рекомендовать угловые параметры зубьев и их количество на пиле при создании нового ГОСТа на пилы. Со значений  $\angle \delta = 60 - 75^\circ$ , рекомендовавшимися до введения нового ГОСТа на круглые пилы, сейчас перешли на  $\angle \delta = 50 - 55^\circ$ .

Покажем метод построения графика скоростей для круглых пил.

На данной пиле, где могут распиливаться разные высоты пропила  $h_1, h_2$  и т. д., будут при использовании мощности меняться значения  $U, k^1, m, \theta$ . Однако для данной высоты пропила  $h$  они будут иметь свои определенные значения (формула 11).

Определяя для каждого значения  $h$  соответствующие значения  $K'$ ,  $m$ ,  $\Theta$ , находим из уравнения (см. формулу 11)  $U$  и в результате получаем в осях координат ( $h$ ,  $U$ ) кривую скоростей подачи (рис. 5). Нанеся на оси ординат конструктивные скорости подачи  $U_1, U_2, U_3, \dots$ , получаем паспортную характеристику данного станка, позволяющую судить, какие высоты пропила, при каких конструктивных скоростях можно распиливать, как будет при этом использоваться мощность, какие максимальные высоты заготовки можно распиливать при полном использовании мощности. Нанеся на график кривые скорости подачи для разных пород (дуб, береза), расширяем возможность его применения.

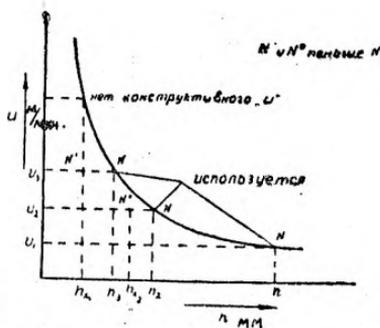


Рис. 5.

Мы излагаем кратко метод применения единой формулы резания, не приводя номограмм, упрощающих расчеты, и не охватывая все вопросы и анализы, а только ряд основных.

#### Пример анализа формулы применительно к фрезерованию

В данном случае анализ надо вести по  $N$ ,  $P$  и  $P_{\phi}$ . При соответствующих подстановках получим:

$$N = \frac{a_p \cdot a_{\mu} \cdot a_v \cdot K' Z^m \cdot n^m D^{0,5m} h^{1-0,5m} b U^{1-m}}{6 \cdot 10^3 (1+m)}, \quad (13)$$

$$P = \frac{10^3 (1-m) a_p \cdot a_{\mu} \cdot a_v \cdot K' Z^m h^{1-0,5m} \cdot b U^{1-m}}{\pi \cdot n^{1-m} \cdot D^{1-0,5m}}, \quad (14)$$

$$P_{\phi} = \frac{10^3 (1-m) a_s \cdot a_w \cdot a_v \cdot K' h^{0,5(1-m)} \cdot b \cdot U^{1-m}}{Z^{1-m} \cdot D^{0,5(1-m)} n^{1-m}}. \quad (15)$$

Из анализа формул видим:

- 1) с увеличением  $Z$  и  $n$  мощность растет,
- 2) усилие резания растет с увеличением  $Z$  и падает с увеличением  $n$ ,
- 3) возмущающая сила  $P_{\phi}$ , влияющая на вибрацию доски при фрезеровании, падает с увеличением  $Z$  и  $n$ .

Таким образом, исходя из кинематической и вибрационной чистоты обработки, целесообразно при механических подачах увеличивать  $Z$  и  $n$ , повышая мощность  $N$ .

При ручных подачах целесообразно увеличивать число оборотов  $n$ , облегчая работу станочника. Увеличение числа пожей  $Z$  нецелесообразно при ручных подачах, так как из-за неточности установки пожей и при сравнительно небольших скоростях подач  $U$  участие в кинематических неравноостях принимает всегда только один нож. Что касается увеличения  $D$ , то на  $N$  влияние его незначительно, так как одновременно изменяется  $a_v$ . Сила резания и возмущающая сила значительно уменьшаются с увеличением  $D$ . Однако, увеличение  $D$  ограничивает фактор увеличения веса станка и усложнение балансировки вала.

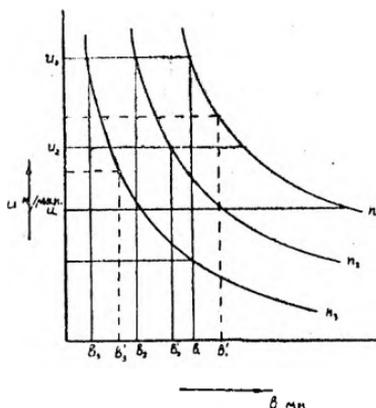


Рис. 6.

Что касается графиков скоростей, то с изменением припуска на обработку будут изменяться  $K^1$ ,  $m$ ,  $\psi$ , в силу чего надо строить кривые скоростей для каждого припуска  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  при разных ширинах стружки  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  (рис. 6) в осях координат ( $b$ ,  $U$ ).

Отложив на оси  $U$  конструктивные скорости подачи  $U_1$ ,  $U_2$ ... получаем возможность определять при разных  $b$  и  $h$  возможные скорости подачи как с использованием  $N$ , так и с недоиспользованием  $N$ , а также с учетом разных пород.

Далеко не исчерпав вопросы расчетного метода, мы кратко изложили основы расчетов для того, чтобы дать представление о методе анализа режимов обработки в зависимости от основных факторов, влияющих на процесс резания.