

УДК 622.232

А.М.МЕШКОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ СРЕДНЕЙ И МГНОВЕННОЙ НАГРУЗКАМИ ГОРНЫХ МАШИН

Режим работы горной машины выбирает исходя из максимальной производительности при допустимом уровне динамической нагрузки. Достижение максимально допустимой скорости подачи определяет оптимум между средней и мгновенной нагрузками, следовательно, допустимый уровень динамики.

Существование оптимума объясняется разным влиянием режимных параметров на среднюю и мгновенную нагрузку. Основными режимными параметрами, влияющими на изменение средней и мгновенной нагрузки, являются скорость подачи v_n ; скорость резания v_p ; количество резцов на исполнительном органе n ; количество резцов в линии резания n_n и количество линий резания n_t . От n_n и n_t зависит общее количество резцов на исполнительном органе $n = n_n n_t$. Для упрощения рассмотрим влияние на среднюю и мгновенную нагрузку только общего количества резцов.

Средняя нагрузка комбайна достаточно точно описывается энергетической характеристикой, выражающей зависимость средней мощности, потребляемой комбайном, $\bar{P}$ от режимных параметров v_n , v_p и n . При раздельном влиянии их на потребляемую мощность энергетическая характеристика может быть записана в виде

$$\bar{P} = A_1 v_p; \bar{P} = A_2 + B_2 v_n; \bar{P} = A_3 + B_3 n,$$

где A_1, A_2, A_3, B_2, B_3 — коэффициенты, характеризующие удельные нагрузки.

Мгновенная нагрузка в детерминированном виде описывается динамическими характеристиками, выражающими зависимость среднеквадратического отклонения мощности от режимных параметров v_n , v_p и n . Динамические характеристики^х имеют следующий вид:

$$\sigma_p = K_1 v_n; \sigma_p = K_2 \frac{1}{v_p},$$

где K_1 и K_2 — эмпирические коэффициенты.

Зависимость $\sigma_p = f(n)$ может быть найдена из следующих соотношений,

^х Коломийцов М.Д. Горные машины и комплексы / Ленинградский горный ин-т. Л., 1984. 55 с.

Коломийцов М.Д. Эксплуатация горных машин и автоматизированных комплексов / Ленинградский горный ин-т. Л., 1986. 94 с.

Корреляционная функция мощности $K_p(\tau)$ определяется корреляционной функцией на резце $K_z(\tau)$:

$$K_p(\tau) = K_{\text{ош}} n K_z(\tau),$$

где $K_{\text{ош}}$ - коэффициент, учитывающий количество резцов на исполнительном органе, одновременно участвующих в работе.

При $\tau = 0$ $K_p(0) = D_p$, следовательно,

$$D_p = K_{\text{ош}} n D_z \Rightarrow \sigma_p = \sqrt{n K_{\text{ош}}} \sigma_z,$$

где D_z - дисперсия усилия на резце; D_p - дисперсия мощности; σ_p - среднеквадратическое отклонение мощности; σ_z - среднеквадратическое отклонение усилия на резце.

Известно, что $\sigma_z \approx S$, где S - площадь стружки, снимаемой резцом,

$$S = h t = \frac{v_n D}{v_p n_n} \frac{B_z}{n_t} = \frac{S'}{n};$$

h - средняя толщина срезаемой стружки; t - расстояние между линиями резания (ширина стружки).

Таким образом,

$$\sigma_z \approx S = \frac{S'}{n} \Rightarrow \sigma_z = K'' \frac{S'}{n},$$

т.е. среднеквадратическое отклонение усилия обратно пропорционально количеству резцов.

Среднеквадратическое отклонение мощности

$$\sigma_p = \sqrt{K_{\text{ош}} n} \sigma_z = \sqrt{K_{\text{ош}} n} K'' \frac{S'}{n} = \frac{K'' S' \sqrt{K_{\text{ош}}}}{\sqrt{n}}; \quad \sigma_p = K_3 / \sqrt{n},$$

где K_3 - эмпирический коэффициент.

Общая зависимость среднеквадратического отклонения от режимных параметров имеет вид

$$\sigma_p = K_4 \frac{v_n}{v_p \sqrt{n}}, \quad (1)$$

где K_4 - эмпирический коэффициент.

Зависимость фактической средней мощности от режимных параметров может быть представлена в виде

$$\bar{P} = K_x v_p + A v_p v_n n + B v_p v_n n, \quad (2)$$

где $K_x v_p = P_x$ - мощность при холостом ходе; K_x - коэффициент холостого хода; $A v_p v_n n = P_{\text{тр}}$ - мощность, затрачиваемая на трение резцов о породу; $B v_p v_n n = P_{\text{вн}}$ - мощность, затрачиваемая на разрушение породы; A и B - эмпирические коэффициенты.

Условием, устанавливающим связь между средней и мгновенной нагрузкой, может служить равенство средней и устойчивой мощности. Устойчивая мощность

$$P_{\text{уст}} = P_{\text{max}} \Phi - K \sigma_p,$$

где $P_{\text{max ф}}$ — максимальная фактическая мощность двигателя привода исполнительного органа; K — коэффициент, характеризующий относительное отклонение мощности, принимаемый в зависимости от требуемой вероятности работы без сгорания.

Выразив среднеквадратическое отклонение мощности с помощью совокупности режимных параметров (1), получим уравнение устойчивой мощности в виде

$$P_{\text{уст}} = P_{\text{max ф}} - K K_4 \frac{v_n}{\sqrt{n} v_p} \quad (3)$$

При работе комбайнов основным фактором, ограничивающим скорость подачи, как показывает практика^X, является тепловая мощность двигателя. Уравнение для тепловой мощности, для оценки влияния на нее режимных параметров и условий работы удобно представить в виде

$$P_T = P_n \sqrt{1 + M v_n} \quad (4)$$

где P_n — номинальная мощность двигателя, кВт; M — удельные простои горной машины, с/м.

Ограничивающим условием при решении задачи об оптимальном соотношении между средней и мгновенной нагрузками служит связь среднего значения $\bar{P}$ среднеквадратическим отклонением мощности. Установленное в теории надежности для обеспечения долговременной работы горной машины отклонение

$$\sigma_P \leq 0,3 \bar{P} \quad (5)$$

Используя уравнения (2)–(4), можно найти оптимальное соотношение между средней и мгновенной нагрузками из условия равенства средней, устойчивой и тепловой мощностей, что обеспечит максимально возможную скорость подачи. Необходим анализ функциональной зависимости $v_n = f(v_p, n)$, обеспечивающей $v_{n \text{ max}}$ и $\bar{P} = P_{\text{уст}} = P_T$ при минимальных удельных энергозатратах, затрачиваемых на резание породы, и неблокированности резания.

При решении данной задачи зависимость (5) служит граничным условием.

Условием минимума удельных энергозатрат ($H_w = \min$) и неблокированности резания является соотношение

$$t/n = \text{const} = c, \quad (6)$$

где c — постоянный коэффициент, зависящий от типа режущего инструмента и свойств породы.

Для упрощения расчетов примем $n = n_t n_n$; $h = v_n D / (n_n v_p)$; $t = B_3 / n_t$. Тогда

$$n_n = (n_t v_n D c) / (B_3 v_p); \quad n = (n_t v_n D c) / (B_3 v_p).$$

Основным условием расчета является равенство мощностей $P_{\text{уст}} = \bar{P} = P_T$, представленных системой уравнений (2)–(4). Для обеспечения $H_w = \min$ замнем в этих уравнениях n на n_t по условию (6):

^X Коломийцов М.Д. Горные машины и комплексы / Ленинградский горный ин-т. Л., 1984. 55 с.

$$P_{уст} = P_{max \phi} - K K_4 \sqrt{\frac{B_3 v_p}{n_t^2 v_n D c}} \frac{v_n}{v_p};$$

$$P_{уст} = P_{max \phi} - K K_4 \sqrt{\frac{B_3}{D c}} \frac{v_n^{1/2}}{n_t v_p^{1/2}},$$

где K' — коэффициент, $K' = K K_4 \sqrt{B_3 / D c}$.

Для упрощения расчетов по формулам

$$\bar{P} = K_x v_p + A v_p v_n \frac{n_t^2 v_n D c}{v_p B_3} + B \frac{n_t^2 v_n D c}{B_3 v_p} v_n v_p,$$

и

$$\bar{P} = K_x v_p + \frac{A D c}{B_3} n_t^2 v_n^2 + \frac{B D c}{B_3} n_t^2 v_n^2,$$

обозначим $A D c / B_3 = A'$ и $B D c / B_3 = B'$. Тогда

$$P_{уст} = P_{max \phi} - K' \frac{v_n^{1/2}}{n_t v_p^{1/2}};$$

$$\bar{P} = K_x v_p + A' n_t^2 v_n^2 + B' n_t^2 v_n^2;$$

$$P_t = P_n \sqrt{1 + M v_n}.$$
(7)

Решим совместно уравнения (7), исходя из равенств $P_{уст} = \bar{P}$ и $\bar{P} = P_t$. После упрощений найдем общую зависимость $v_n = f(v_p, n_t)$ в виде квадратного уравнения

$$2 P_{max} n_t^4 v_p (A' + B') v_n^2 - (P_n^2 M n_t^2 - K'^2) v_n - n_t^2 v_p (P_{max}^2 + P_n^2 - 2 P_{max} K_x v_p) = 0, \quad (8)$$

Интерес представляет положительный корень квадратного уравнения (8), устанавливающий вид зависимости $v_n = f(v_p, n_t)$ и позволяющий определить максимальную скорость подачи

$$v_n = \frac{P_n^2 M n_t^2 v_p - K'^2 + \sqrt{P_n^4 M^2 n_t^4 v_p^2 - 2 P_n^2 M K' n_t^2 v_p + n_t^6 v_p^2 (A' + B') (8 P_{max}^3 + 4 P_{max} (A' + B') n_t^4 v_p)}}{4 P_{max} (A' + B') n_t^4 v_p} + \frac{8 P_{max} P_n^2 - n_t^2 v_p^3 - 16 P_{max} K_x (A' + B')}{4 P_{max} (A' + B') n_t^4 v_p}.$$
(9)

Проанализируем зависимость (9). При $n_t = \text{const}$ уравнение (9) можно рассматривать как зависимость $v_n = f(v_p)$. Введя новые обозначения, запишем уравнение (9) в виде

$$v_n = \frac{S_1 v_p - S_2 + \sqrt{S_4 v_p^2 + S_5^2 - S_5 v_p - S_6 v_p^3}}{S_3 v_p}, \quad (10)$$

где $S_1 = P_n^2 M n_t^2$; $S_2 = K'^2$; $S_3 = 4 P_{max} (A' + B') n_t^4$; $S_4 = P_n^4 M^2 n_t^4 + n_t^6 (A' + B') (8 P_{max}^3 + 8 P_{max} P_n^2)$; $S_5 = 2 P_n^2 M K' n_t^2$; $S_6 = n_t^6 \cdot 16 P_{max} K_x (A' + B')$.

Анализ уравнения (10) позволяет установить графический вид зависимости $v_n = f(v_p)$ (см. рисунок). Рассмотрим вид зависимости при положительных значениях v_n и v_p . При $v_p \rightarrow 0$, $v_n \rightarrow 0$ и в точке $v_p = 0$ функция $v_n = f(v_p)$ не определена.

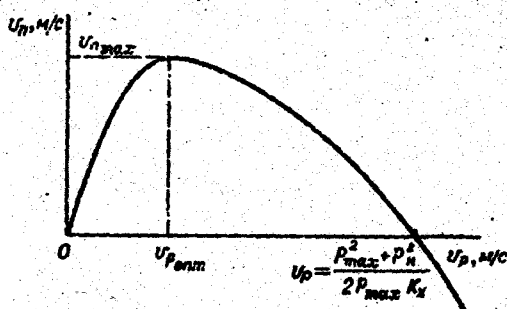


График изменения скорости подачи как функции скорости резания при $\bar{P} = P_{уст} = P_T$

или

При $v_p = (P_{max}^2 + P_n^2) / (2 P_{max} K_x)$
 $v_n = 0$ функция уходит в область отрицательных значений скорости подачи.

Функция $v_n = f(v_p)$ на отрезке от $v_p = 0$ до $v_p = (P_{max}^2 + P_n^2) / (2 P_{max} K_x)$ имеет один максимум. Его значение найдем по первой производной уравнения (10), приравненной нулю:

$$\frac{dv_n}{dv_p} = \left(\frac{S_1}{S_3} - \frac{S_2}{S_3 v_p} + \frac{1}{S_5} \sqrt{S_4 + \frac{S_2^2}{v_p^2}} - \frac{S_5}{v_p} \cdot \frac{1}{v_p S_5} \right) = 0$$

$$v_p^6 S_5 S_3^2 - v_p^4 S_5 S_3^2 - v_p^3 (4 S_2^2 S_5 - 2 S_2^2 S_3^2) + v_p^2 4 S_2^2 S_4 - v_p 4 S_2^2 S_5 + 4 S_2^4 = 0. \quad (II)$$

Уравнение (II) является многочленом шестой степени, и его можно решить только приближенными методами. Исходя из этого, значение скорости резания $v_{p, опт}$, обеспечивающее максимальную скорость подачи $v_{n, max}$ (см. рисунок), если другие параметры постоянны, для каждого конкретного случая отдельно находят методом интерполяции.

При $v_p = const$ зависимость (9) можно рассматривать как $v_n = f(n_t)$. Представим уравнение (9) в виде

$$v_n = \frac{R_1 n_t^2 - R_2 + \sqrt{n_t^4 R_1^2 + R_2^2 - n_t^2 R_3 + n_t R_4}}{n_t^2 R_5}, \quad (12)$$

введя обозначения: $R_1 = P_n^2 M v_p$; $R_2 = K^{12}$; $R_3 = 2 P_n^2 M K^{12} v_p$; $R_4 = v_p^2 (A' + B') (8 P_{max}^3 + 8 P_{max} P_n^2) - v_p^3 16 P_{max}^2 K_x (A' + B')$; $R_5 = 4 P_{max} v_p (A' + B')$.

Уравнение (12) в графическом виде представляет собой симметричную относительно оси положительных значений скорости подачи гиперболу, так как n_t в знаменателе формулы (12) имеет четную степень. При $n_t \rightarrow \infty$ $v_n \rightarrow 0$; при $n_t \rightarrow 0$ $v_n \rightarrow \infty$.

Функция $v_n = f(n_t)$ на отрезке $n_t = 0$ и $n_t = +\infty$ не имеет максимума. Для увеличения скорости подачи следует снижать n_t . Значение n_t ограничено шириной захвата B_z исполнительного органа комбайна и условием минимальных удельных энергозатрат ($t/\lambda = const$).

Чтобы найти максимум функции $v_n = f(v_p, n_t)$ по уравнению (9) при изменяющихся v_p и n_t , необходимо определить первую производную уравнения (12), приравняв ее нулю, решить полученное уравнение совместно с уравнением (II) и определить v_p и n_t .

Для упрощения расчетов, так как зависимость $v_n = f(n_t)$ не имеет максимума, значение n_t находят из условия обеспечения минимума удельных энер-

гозатрат на разрушение породы и недоокрованности резания. При известных n_t по уравнению (II) для конкретной горной машины вычисляют скорость резания, обеспечивающую максимальную скорость подачи.

Уравнение (9) устанавливает зависимость $v_n = f(v_r, n_t)$ и позволяет находить максимально допустимую скорость подачи при условии равенства средней, устойчивой и тепловой мощностей. Обеспечиваемые при этом максимальная производительность и оптимальное соотношение между средней и мгновенной нагрузками позволяют говорить о рациональном режиме работы горной машины в данных конкретных условиях.