

УДК 622.232(043.3)

А.А. Грабский, А.А. Губенко, Д.А. Кузнев

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА КАРЬЕРНОГО КОМБАЙНА С РОТОРНЫМ КОВШОВЫМ ОРГАНОМ

Выполнен анализ и установлены основные закономерности кинематических особенностей рабочего процесса карьерного комбайна с роторным ковшовым рабочим органом.

Ключевые слова: карьерный комбайн, роторный ковшовый орган, сумма сечений стружек.

Семинар № 22

Процесс экскавации породы должен осуществляться в строгом соответствии с кинематическими условиями рабочего процесса карьерного комбайна с роторным ковшовым рабочим органом [1]. Рабочий процесс выемки породы карьерным комбайном с роторным ковшовым органом осуществляется путем сочетания его поступательного движения со скоростью V (м/с) и

вращательного движения ковшового ротора со скоростью ω (рад/с) и представляется удлинненными циклоидами (трохоидами), показанными на рис. 1 на участке взаимодействия с забоем – кривая 1. Параметрические уравнения кривой 1 с учетом вращения ротора против направления его поступательного движения имеют вид:

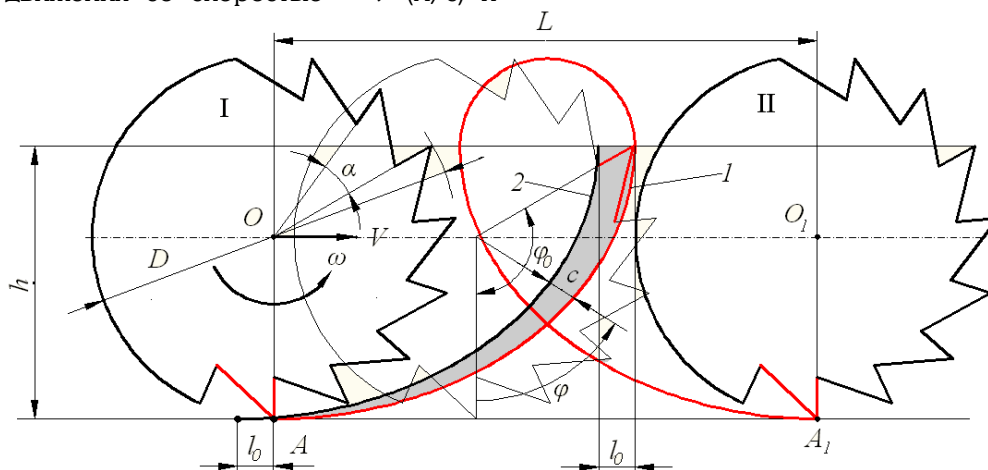


Рис. 1. Траектория движения ковша роторного рабочего органа карьерного комбайна при выемке слоя породы

$$x(t) = Vt - 0.5D \sin(\omega t), \text{ м}, \quad (1)$$

$$y(t) = 0.5D \cos(\omega t) - V/\omega, \text{ м}, \quad (2)$$

где D – диаметр окружности режущих кромок вооружения ковшей ротора, м; t – время вращения ковшового ротора со скоростью ω , с;

Вращение роторного ковшового органа с гравитационной торцовой разгрузкой всегда направлено против поступательного движения комбайна. За время одного оборота роторного ковшового органа некоторая точка на режущей кромке его ковша двигаясь по траектории – 1 переместится из положения A в положение A_1 . За то же время роторный ковшовый орган переместится из положения – I в положение – II, пройдя путь с переносной скоростью – V . Шаг траектории каждого ковша – $L=x(t=T)$ (м), (измеряемый в направлении перемещения комбайна) соответствующий одному его рабочему циклу с периодом – $t=T$ (с) из уравнения 1 при $\omega t = \varphi$ (φ – текущий угол вращения ротора, рад) составит:

$$T = \frac{L - 0.5D \sin 2\pi}{V} = \frac{L}{V} = \frac{2\pi}{\omega}, \text{ с}, \quad (3)$$

откуда, подача роторного ковшового органа за один оборот имеет величину равную:

$$L = 2\pi \frac{V}{\omega}, \text{ м}, \quad (4)$$

Подача на один ковш – l_0 (м) при экскавации породного массива определится как:

$$l_0 = L/z_0 = \frac{2\pi V}{z_0 \omega}, \text{ м}, \quad (5)$$

где z_0 – число ковшей ротора, ед.

Что касается скорости вращения роторов рабочего органа комбайна – ω , то здесь следует отметить, что её минимальное предельное значение при гравитационной торцовой разгрузке ковшей лимитируется критической

скоростью – $\omega_{кр}$ [2, 3], которая определяется равенством противоположно направленных сил тяжести и центробежной для частиц породы расположенных в верхней части ротора на расстоянии $0,5D$ от его оси и характеризуется коэффициентом – $k_v < 1,0$

$$\omega \leq k_v \omega_{кр}, \text{ рад/с}. \quad (6)$$

Далее, с учетом того, что теоретическая производительность карьерного комбайна составляет:

$$Q = \frac{q}{2\pi} z_0 \omega, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (7)$$

$$\text{или } Q = BhV, \quad (8)$$

где q – вместимость одного ковша ротора, м³; B – ширина захвата слоя породы, м; $B_{\min} \leq B \leq B_{\max} = kb$, здесь: k – число роторов рабочего органа комбайна, ед., b – ширина одного ротора рабочего органа комбайна, м; h – высота слоя породы, м,

$$h_{\min} \leq h \leq h_{\max} = \frac{3}{5} D.$$

Приравняв выражение (7) к выражению (8) и решив полученное равенство относительно вместимости одного ковша ротора – q имеем:

$$q \geq \frac{2\pi}{z_0 \omega} bh_{\max} V_{\min}, \text{ м}^3. \quad (9)$$

Уравнение (5) с учетом выражения (8) принимает вид:

$$l_0 = \frac{2\pi Q}{z_0 \omega Bh}, \text{ м}. \quad (10)$$

Траектории движения режущих элементов ковша до высоты забоя – h (м) представляются идентичными кривыми, расположенными в плоскости рис. 1, причем траектория – 2 образуется с опережением траектории – 1 предыдущим ковшом.

После прохода ковша по всей дуге забоя с центральным углом – φ_0 (рад), он отделит от последнего элемент грунта ограниченный линиями 1 и 2. При этом, угол контакта – φ_0 ротор-

ного ковшового органа со слоем породы составит:

$$\varphi_0 = \arccos\left(1 - \frac{2h}{D}\right) + \arcsin \frac{L}{D}, \quad \text{рад.} \quad (11)$$

Учитывая, что отношение L/D является величиной второго порядка малости и то, что синусы малых углов практически равны нулю, вышеприведенное выражение с достаточной степенью точности принимает вид:

$$\varphi_0 = \arccos\left(1 - \frac{2h}{D}\right). \quad (12)$$

Для определения первой и основной составляющей – затрат энергии на преодоление сопротивлений отделения породы от массива – установим геометрию породной стружки. Толщину стружки – c режущей кромки ковша в его положении, соответствующему текущему углу – φ (рис. 2) отсчитываемому от крайнего нижнего положения найдем как расстояние между точками $a(x_a, y_a)$ и $b(x_b, y_b)$ показанными на рисунке 2 по формуле:

$$c = \left[(x_b - x_a)^2 + (y_a - y_b)^2 \right]^{0.5}, \quad \text{м} \quad (13)$$

где координаты точек a и b в соответствии с выражениями (1) и (2) определяются как:

$$\begin{aligned} x_b &= \varphi \cdot l_0 / \alpha + 0.5D \sin \varphi, \quad \text{м} \\ x_a &= (\varphi - \alpha) l_0 / \alpha + 0.5D \sin(\varphi - \alpha), \quad \text{м} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} y_b &= 0.5D \cos \varphi - l_0 / \alpha, \quad \text{м} \\ y_a &= 0.5D \cos(\varphi - \alpha) - l_0 / \alpha, \quad \text{м} \end{aligned} \quad (15)$$

здесь α – центральный угол между режущими кромками ковшей ротора составляющий величину:

$$\alpha = 2\pi / z_0, \quad \text{рад} \quad (16)$$

Уравнение (13) с учетом (14) и (15) принимает вид:

$$c(\varphi) = 0.5D \left\{ \begin{aligned} & \left[\sin \varphi - \sin(\varphi - \alpha) + l_0 / D \right]^2 + \\ & \left[\cos(\varphi - \alpha) - \cos \varphi \right]^2 \end{aligned} \right\}^{0.5}, \quad \text{м.} \quad (17)$$

Далее с учетом того, что l_0/D является величиной второго порядка малости выражение (17) при $0 \leq \varphi \leq \varphi_0$ после соответствующих алгебраических преобразований принимает вид:

$$c(\varphi) = k_y l_0 (1 - \cos \varphi + k_x \sin \varphi)^{0.5}, \quad \text{м} \quad (18)$$

здесь k_y, k_x – коэффициенты координат формы и положения траектории движения ковша ротора по удлиненной циклоиде (трохоиде) по осям y и x соответственно.

Коэффициент k_x определяется из условия, что в точке $\varphi = \varphi_{0\max}$,

$$\frac{dc(\varphi)}{d\varphi} = 0. \quad \text{С учетом уравнения (18)}$$

коэффициент k_x определится как:

$$k_x = -\sin \varphi_{0\max} / \cos \varphi_{0\max} \quad (19)$$

В свою очередь коэффициент k_y

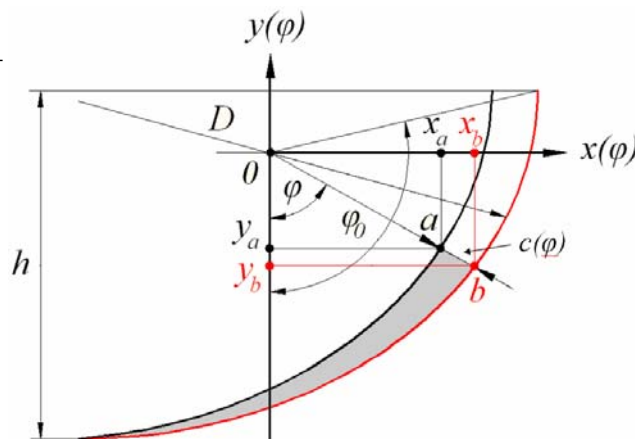


Рис. 2. Расчетная схема определения толщины стружки срезаемой одним ковшом

определится из уравнения (18) по условию, что при $\varphi = \varphi_{0\max}$, толщина стружки составит $c(\varphi_{0\max})/l_0 \leq 1$. Далее переходя к пределу и учитывая выражение (19) коэффициент формы k_y будет составлять величину:

$$k_y = \left(1 - \cos \varphi_{0\max} - \frac{\sin^2(\varphi_{0\max})}{\cos(\varphi_{0\max})} \right)^{-0.5} \quad (20)$$

Так для карьерного комбайна с роторным ковшовым рабочим органом КСМ-2000 Р совместного производства «Крупн Индустритехник» – «Ижора-Картекс» с диаметром ротора $D = 4.8$ м, числом ковшей на роторе $z_0 = 15$ ед, с расчетной высотой обрабатываемого слоя $h_{\max} = 2.9$ м. ($\varphi_0 = 2.513$, рад.) $k_x = 0.727$ и $k_y = 0.669$

Сечение стружки – S_r срезанной одним ковшом в горизонтальной плоскости в пределах угла контакта $0 \leq \varphi \leq \varphi_0$ роторного ковшового органа со слоем породы определится как:

$$S_r = B \cdot c(\varphi), \text{ м}^2 \quad (21)$$

Максимальная сумма сечений стружек срезанных роторным ковшовым органом составит:

$$S_{\Sigma_{\max}} = B \sum_{i=1}^z c_i [\varphi_0 - (z-i)\alpha], \text{ м}^2 \quad (22)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, z-1, z$$

где z – число ковшей роторного рабочего органа в забое, ед.,

При высоте слоя породы – h , минимальное число ковшей в забое на одном роторе – z (ед) с учетом результатов полученных в [1] и уравнений (12) и (16) определится как:

$$z = \text{ent} \left[\frac{\arccos \left(1 - \frac{2h}{D} \right)}{2\pi} z_0 \right], \text{ ед} \quad (23)$$

Здесь символ «ent» (от слова «le entier») обозначает оператор выделения целочисленной части числа.

В свою очередь, минимальная сумма сечений стружек срезанных роторным ковшовым органом составит:

$$S_{\Sigma_{\min}} = B \sum_{i=1}^{z-1} c_i [\varphi_0 - (z-i)\alpha], \text{ м}^2 \quad (26)$$

В момент выхода z -го ковша из забоя максимальная сумма сечений стружек срезанных роторным ковшовым

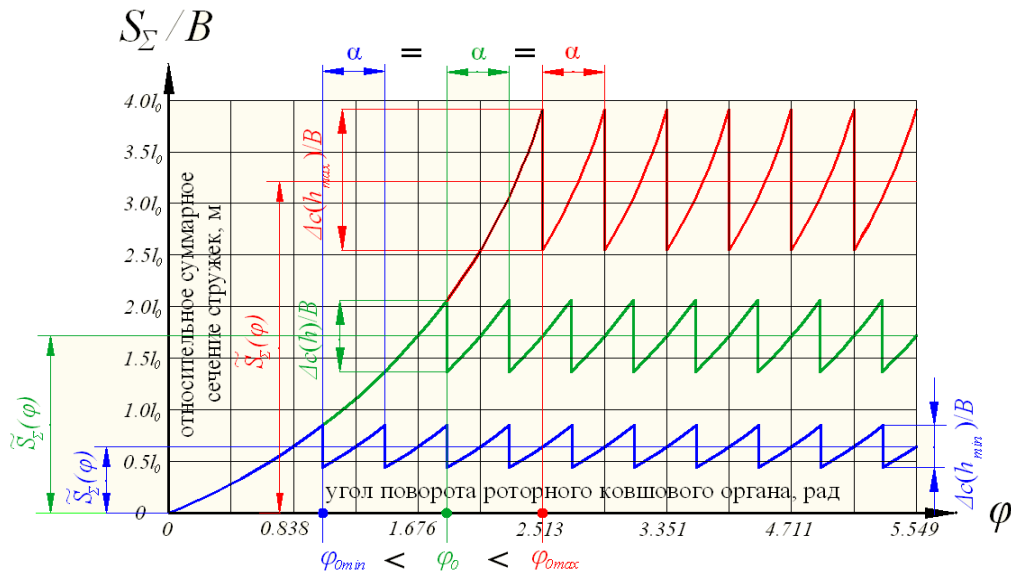


Рис. 3. Процесс колебаний относительного суммарного горизонтального сечения стружек (отнесенного к ширине захвата – B) в функции угла поворота роторного ковшового органа – φ при различных углах его контакта – φ_0 со слоем породы при работе карьерного комбайна КСМ-2000 Р с: диаметром ротора $D = 4.8$ м; числом ковшей на роторе $z_0 = 15$ ед; для максимальной высоты обрабатываемого слоя $h_{max} = 2.9$ м ($\varphi_0 = 2.513$, рад.) $k_x = 0.727$ и $k_y = 0.669$

органом уменьшается на величину (размах) – Δc равную:

$$\Delta c = S_{\Sigma_{max}} - S_{\Sigma_{min}} = B \cdot c(\varphi_0) = B \cdot k_y l_0 (1 - \cos \varphi_0 + k_x \sin \varphi_0)^{0.5}, \text{ м}^2 \quad (27)$$

Выражение (27) с учетом уравнения (12) принимает вид:

$$\Delta c = k_y B \frac{2\pi V}{z_0 \omega} \times \left(\frac{2h}{D} + k_x \sin \left[\arccos \left(1 - \frac{2h}{D} \right) \right] \right)^{0.5}, \text{ м}^2 \quad (28)$$

Графическая интерпретация процесса колебаний относительного суммарного горизонтального сечения стружек (уравнения (22) и (26) отнесенные к ширине захвата – B) в функции угла поворота роторного ковшового органа – φ при различном угле его контакта – φ_0 со слоем породы

приведена на рис. 3. Анализ, последнего свидетельствует, что:

- с уменьшением угла контакта роторного ковшового органа – φ_0 со слоем породы разность между относительным максимальным – $S_{\Sigma_{max}}$ и минимальным – $S_{\Sigma_{min}}$ значением суммы горизонтальных сечений стружек (размах процесса колебаний) уменьшается при постоянной частоте выхода ковша из забоя (входа ковша в забой) равной:

$$f = z_0 \omega / 2\pi, \text{ Гц} \quad (29)$$

- колебания суммарного горизонтального сечения стружек происходят относительно среднего значения – $\tilde{S}_{\Sigma}(\varphi)$ равного:

$$\tilde{S}_{\Sigma}(\varphi) = (S_{\Sigma_{max}} + S_{\Sigma_{min}}) / 2 \text{ с амплитудой } - \Delta c / 2B.$$

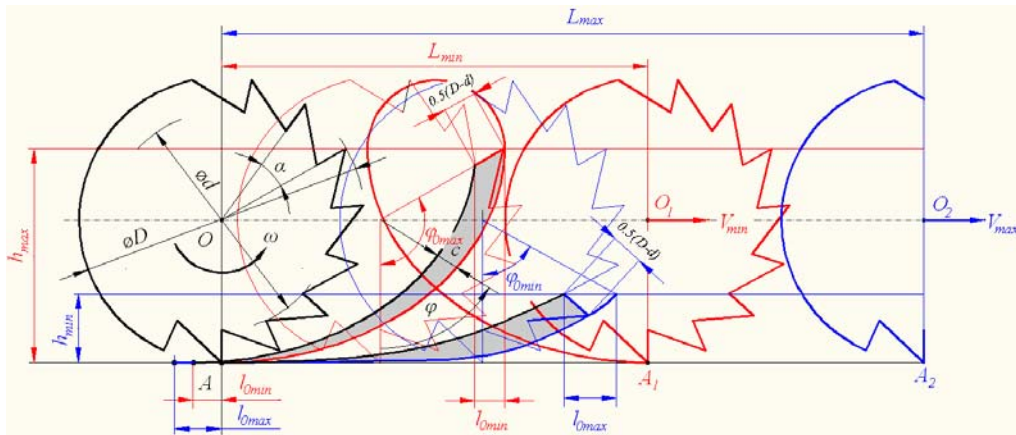


Рис. 4. Вертикальные сечения стружек для слоев породы различной высоты при движении комбайна в забое со скоростью – V обратно пропорциональной высоте слоя – h

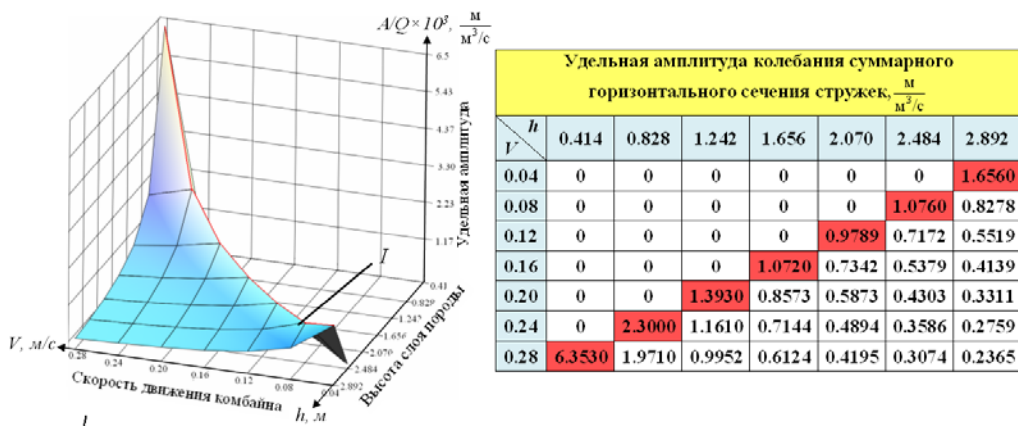


Рис. 5. Зависимость величины амплитуды колебания суммарного горизонтального сечения стружек на один кубический метр разрушенной породы от высоты слоя – h, и скорости движения комбайна в забое – V (зона невозможности работы карьерного комбайна)

$$\tilde{S}_z(\varphi) = \left\{ \begin{array}{l} c_{i=z} [0.5(z-1)\alpha] + \\ + \sum_{i=1}^{z-1} c_i [\varphi_0 - (z-i)\alpha] \end{array} \right\} \pm \quad (30)$$

$$\pm 0.5k_y l_0 \left(\frac{2h}{D} + k_x \sin \left[\arccos \left(1 - \frac{2h}{D} \right) \right] \right)^{0.5}$$

С учетом выражений (28) и (29) величина амплитуды – A = Δс/2В составит:

$$A = k_y \frac{BV}{2f} \times \quad (31)$$

$$\times \left(\frac{2h}{D} + k_x \sin \left[\arccos \left(1 - \frac{2h}{D} \right) \right] \right)^{0.5}, \text{ м}^2$$

Для уяснения характера влияния высоты слоя породы – h на скорость движения комбайна в забое – V найдем последнюю из условия того, что

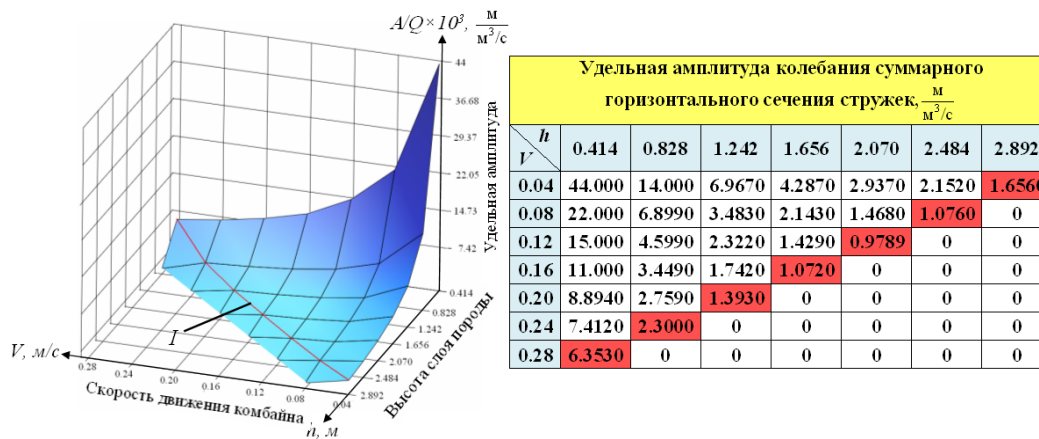


Рис. 6. Зависимость величины амплитуды колебания суммарного горизонтального сечения стружек на один кубический метр разрушенной породы от высоты слоя – h , и скорости движения комбайна в забое – V (зона работы карьерного комбайна с пониженной производительностью)

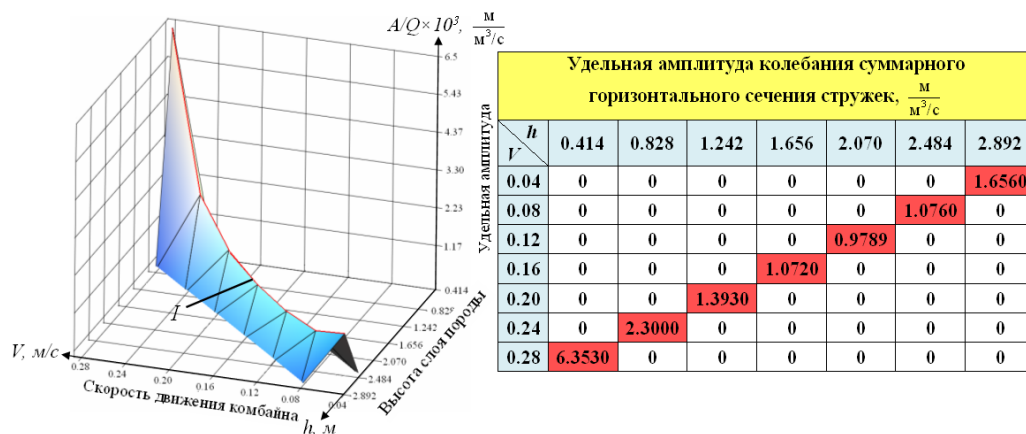


Рис. 7. Линия контакта первой (рис. 5) и второй (рис. 6) зон зависимости амплитуды колебания от высоты слоя – h , и скорости движения комбайна в забое – V , характеризующая изменение относительной амплитуды колебаний суммарного горизонтального сечения стружек при работе карьерного комбайна с постоянной (максимальной) производительностью

объем грунта срезаемый одним ковшем при работе комбайна на слоях породы различной высоты

$$h_{\min} \leq h \leq h_{\max} = \frac{3}{5} D \text{ для поддержания}$$

максимально возможного уровня производительности должен всегда

оставаться постоянным ($q = const$). Это условие позволяет получить из выражения (9) нижеследующее соотношение:

$$h_{\max} V_{\min} = Vh, \quad (32)$$

Таким образом, для поддержания максимально возможного уровня

производительности комбайна скорость его движения в забое должна быть прямо пропорциональна относительной высоте слоя породы:

$$V = V_{\min} \frac{h_{\max}}{h}, \text{ м/с}, \quad (33)$$

Следует отметить, что уравнение (33) имеет область определения скорости движения комбайна в забое – V , только в пределах $V_{\min} \leq V \leq V_{\max}$, при этом, максимальная толщина стружки – $c(\varphi_0)$ на любой высоте слоя породы – $h(\varphi_0)$ не должна превышать длины (вылета) ковша равного величине $0.5(D - d)$ (м) (здесь d – диаметр крепления ковшей к ротору). Вертикальные сечения стружек для слоев породы различной высоты при движении комбайна в забое со скоростью – V обратно пропорциональной высоте слоя – h приведены на рис. 4.

Далее, с учетом уравнения (33) выражение (31) принимает вид:

$$A = k_y \frac{V_{\min} h_{\max}}{2f h} \times \left(\frac{2h}{D} + k_x \sin \left[\arccos \left(1 - \frac{2h}{D} \right) \right] \right)^{0.5}, \text{ м}^2 \quad (34)$$

Затем, поделив обе части уравнения (34) на величину текущей производительности комбайна – $Q = BhV/k_p$ ($\text{м}^3/\text{ч}$), получим величину амплитуды колебания суммарного горизонтального сечения стружек на один кубический метр разрушенной породы:

$$A/Q = \frac{k_y k_p h_{\max}}{2Bh^2 f} \times \left(\frac{2h}{D} + k_x \sin \left[\arccos \left(1 - \frac{2h}{D} \right) \right] \right)^{0.5} \times \frac{V_{\min}}{V}, \frac{\text{м}}{\text{м}^3/\text{с}} \quad (35)$$

где k_p – коэффициент разрыхления породы в ковше. По данным приве-

денным в работе [4] для пород подлежащих экскавации без предварительного проведения буровзрывных работ $k_p = 1.25 \div 1.45$.

Результаты расчетов и графическая интерпретация уравнения (35) в координатах – $\frac{A}{Q}(h, V)$; h и V приве-

дены на рисунках 5, 6 и 7. Анализ, которых свидетельствует, что имеются две характерные зоны (поверхности) изменения относительной амплитуды колебаний суммарного горизонтального сечения стружек, контактирующих по пространственно расположенной линии – l .

Выводы

1. Процесс выемки породы карьерным комбайном с роторным ковшовым органом характеризуется следующими кинематическими особенностями:

- траектория
- движения ковша соответствует удлинённой циклоиде (трохоиде) за счет сочетания его поступательного движения со скоростью – V (м/с) и вращательного движения ковшового ротора со скоростью – ω (рад/с);

• с уменьшением угла контакта роторного ковшового органа – φ_0 со слоем породы размах процесса колебаний суммы горизонтальных сечений стружек уменьшается при постоянной частоте выхода ковша из забоя (входа ковша в забой) равной $f = z_0 \omega / 2\pi$, Гц;

• для поддержания максимально возможного уровня производительности при постоянной скорости вращения роторного ковшового органа комбайна ($\omega = \text{const}$) скорость его движения в забое должна быть прямо пропорциональна относительной вы-

соте слоя породы: $V = V_{\min} \frac{h_{\max}}{h}$, м/с;

2. Установлено, что при работе комбайна на слоях породы различной

высоты $h_{\min} \leq h \leq h_{\max} = \frac{3}{5}D$ имеются

две характерные зоны (поверхности) изменения относительной амплитуды колебаний суммарного горизонтального сечения стружек, контактирующих по пространственно расположенной линии:

- первая зона – рисунок 5 с координатами высоты слоя породы от 0.414 до 2.484 м и координатами скорости от 0.04 до 0.24 м в секунду – зона невозможности работы карьерного комбайна, поскольку максимальная толщина стружки больше длины (вылета) ковша $\Delta c(h, V) > 0.5(D - d)$;

- вторая зона – рисунок 6 с координатами высоты слоя породы от 0.828 до 2.892 метра и координатами скорости от 0.08 до 0.28 метра в секунду – зона работы карьерного комбайна с пониженной производительностью;

- линия контакта первой и второй зон – рисунок 7 характеризует изменение относительной амплитуды колебаний суммарного горизонтального сечения стружек при работе карьерного комбайна с постоянной (максимальной) производительностью;

- Отрезок пространственно расположенной линии – I (рис. 5, 6 и 7) с координатами высоты слоя с 2.07 (0.42D) до 2.892 (0.625D) метра и скоростью с 0.12 ($6V_{\min}$) до 0.28 ($14V_{\min}$) метров в секунду характеризует работу комбайна при высоте слоя больше половины диаметра его рабочего органа – $h > 0.5D$ ($\varphi_0 > 0.5\pi$);

- Минимальное значение относительной амплитуды соответствует координатам высоты слоя 2.07 (0.43D) метра и скорости 0.12 ($6V_{\min}$) метров в секунду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подэрни Р.Ю. Теория рабочего процесса роторных исполнительных органов. Учебное пособие, М.: МГИ, 1969, 74 с.

2. Подэрни Р.Ю. Механическое оборудование карьеров: (ГОРНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ). Учебник для вузов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МГТУ, 2007. – 680 с.: ил.

3. Владимиров В.М., Трофимов В.К. Повышение производительности карьерных многоковшовых экскаваторов. М.: «Недра», 1980, 312 с.

4. Беляков Ю.И., Владимиров В.М. Совершенствование экскаваторных работ на карьерах, М., Изд-во «Недра» 1974. 304 с. **ИИАС**

Коротко об авторах

Грабский А.А. – кандидат технических наук, профессор,
Губенко А.А. – аспирант,
Кузиев Д.А. – кандидат технических наук, старший преподаватель,
Московский государственный горный университет,
Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru

