

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ, УЧИТЫВАЮЩАЯ ОСЕВЫЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ГОРНОГО КОМБАЙНА

Кондрахин В.П. докт. техн. наук, проф., Головин В.Л. инж.

Донецкий национальный технический университет,
Донгипроулемаш

С использованием методов аналитической геометрии в пространстве разработана математическая модель процесса стружкообразования при работе исполнительного органа горного комбайна в режимах высокой интенсивности разрушения, которые сопровождаются значительными колебаниями исполнительного органа вдоль оси его вращения

The paper is devoted to the issue of modeling and simulation of the chip forming process for milling element. The methods of 3-D analytic geometry are used. The elaborated algorithm allows calculating the thickness of chips taking into account space coordinates and axially traveling of working unit. The results can be used for working process simulation of different types of mining machines and machine-tools.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Наиболее сложной задачей при моделировании процесса функционирования исполнительного органа (ИО) горного комбайна является определение мгновенных значений толщины стружки, снимаемой каждым резцом, находящимся в контакте с забоем [1,2,3].

Анализ исследований и публикаций. В большинстве работ, посвященных имитационному моделированию процессов функционирования горных комбайнов, принимается допущение о том, что центр масс исполнительного органа машины движется в вертикальной плоскости, параллельной груди забоя. При этом толщина стружки, снимаемой резцом в любой момент времени может быть определена, если известна траектория резца, находящегося в той же линии резания и следующего перед рассматриваемым резцом. Алгоритм опреде-

ления толщины стружки предусматривает запоминание траектории центра ИО и угла его поворота за время одного оборота.

Однако указанное допущение в ряде случаев может привести к грубым ошибкам при моделировании высокоинтенсивных рабочих процессов комбайна. Согласно данным работы [4], размахи колебаний ИО очистного комбайна КШ-1КГ вдоль оси вращения достигают 6 см и превышают размахи вертикальных колебаний шнека, достигающих 4 см. Аналогичные явления отмечены при присечке породы комбайном ЕДW-300-L [5]. В последнем случае размахи колебаний вдоль оси вращения достигали 3 см, а частота колебаний составила примерно 3 Гц. Очевидно, что такие существенные колебания шнеков в осевом направлении заметно влияют на процесс разрушения. В работе [5] указывается, что "резцы по диагонали пересекают гребни между отдельными резами, переходя из одних линий резания в другие".

На рис. 1 приведены схемы формирования формы и толщины стружки на забойных резцах при последовательном (а) и шахматном резании (б) для случая, когда резец за счет осевых колебаний ИО переместился в соседнюю линию резания. Из рис.1а видно, что для последовательной схемы резания фактическая толщина стружки h_f несущественно отличается от номинального (т.е. определенного без учета осевых перемещений) значения h_n . Иная картина наблюдается для шахматного резания (рис.1б), когда толщина стружки при осевых смещения ИО органа может оказаться примерно в два раза меньше номинального значения. Очевидно, что при возвращении в исходную линию резания толщина стружки может примерно вдвое превышать номинальное значение.

Существенное влияние оказывают осевые перемещения ИО на формирование толщины стружки и нагрузок на кутковых резцах, у которых ширина стружки (шаг резания) в несколько раз меньше, чем у забойных резцов, и, следовательно, существенно меньше возможных осевых перемещений ИО. При этом кутковые резцы (особенно из крайней к забою линии резания) и торцевые резцы часть времени работают как резцы буровых исполнительных органов.

Постановка задачи. Целью данного исследования является разработка математической модели формирования стружки на резцах горного комбайна, учитывающая имеющее место на практике существенные осевые перемещения ИО. При этом сохранены основ-

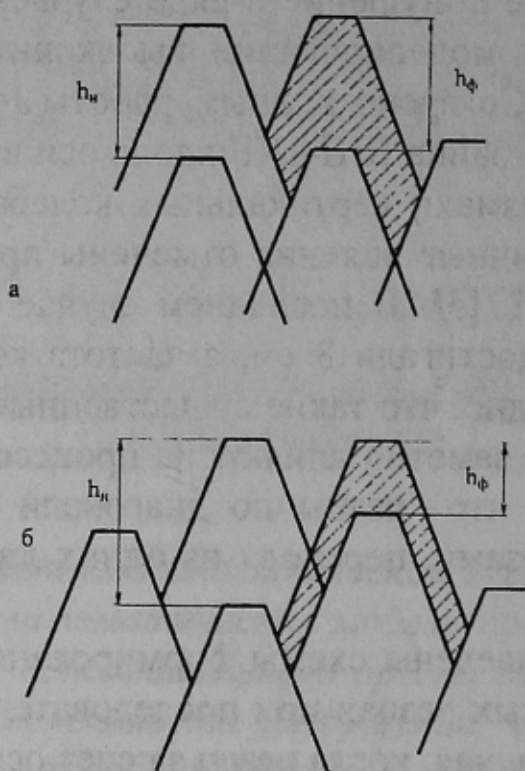


Рисунок 1. – Форма и толщина стружки при смещении резца в соседнюю линию резания (а – последовательное резание, б – шахматное резание)

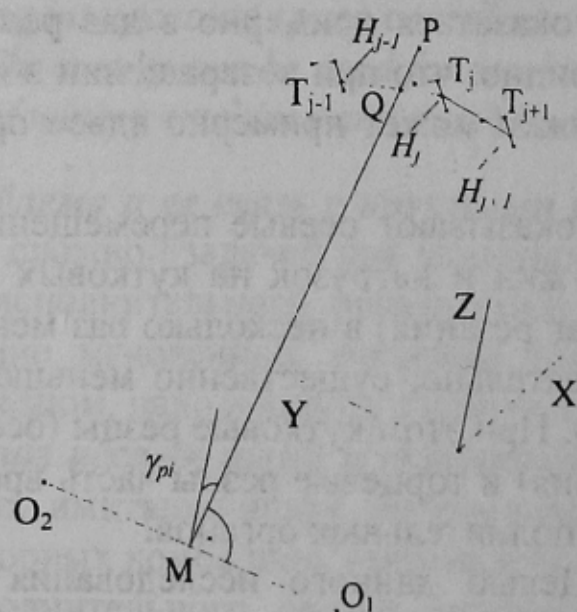


Рисунок 2. – К определению толщины стружки забойного резца.

ные методические подходы к определению толщины стружки, принятые в работе [1], так как на этой работе основаны алгоритмы определения сил резания и подачи на резцах.

Изложение материала и результаты. На рис. 2 приведена схема для определения толщины стружки забойного резца, расположенного в рассматриваемый момент времени в точке Р. При этом ось исполнительного органа занимает положение, определяемое координатами двух любых лежащих на ней точек, например, O_1 и O_2 . Ломанные T_{j-1} , T_j и T_{j+1} представляют собой в дискретной форме отрезки траекторий предыдущих резцов, расположенных в рассматриваемой j и соседних линиях резания. При необходимости (если ожидаются очень интенсивные колебания ИО в направлении оси вращения) могут рассматриваться также траектории T_{j-2} и T_{j+2} .

Для определения толщины стружки следует провести плоскость G через точку Р и ось O_1O_2 и определить координаты точек пересечения этой плоскости с траекториями резцов (точки H_{j-1} , H_j и H_{j+1}). Ломанная $H_{j-1}H_jH_{j+1}$ представляет собой линию пересечения поверхности забоя с плоскостью G . Затем проводим перпендикуляр из точки Р на ось O_1O_2 (прямая РМ) и определяем точку пересечения Q этой прямой с ломанной $H_{j-1}H_jH_{j+1}$. Отрезок $PQ=h_i$ представляет собой толщину стружки, которая снимается рассматриваемым резцом в данный момент времени, определенную с учетом осевых перемещений ИО.

Используя методы аналитической геометрии в пространстве, представим алгоритм определения толщины стружки.

Координаты вершины резца (точка Р на рис. 3) X_{Pi} , Y_{Pi} , Z_{Pi} определяются в неподвижной системе координат $OXYZ$ с учетом поворотов исполнительного органа вокруг оси X – (угол φ_n) и вокруг оси Z (угол φ_{pc}). При этом считается, что координаты X_0 , Y_0 , Z_0 характерной точки ИО (например, точки O_1), а также углы φ_n , φ_{pc} , γ_{pi} известны, так как они определяются в результате решения системы дифференциальных уравнений динамики машины. Очевидно, что в каждый момент времени (на каждом шаге решения) рассматриваются только те резцы, которые находятся в контакте с забоем. Повороты ИО вокруг осей X и Z носят характер малых колебаний (амплитуды не превышают 0,01 рад). С учетом этого получим:

$$X_{Pi} = X_0 + R \sin \gamma_{pi} + l_{pi} \sin \varphi_{pc};$$

$$Y_{Pi} = Y_0 + l_{pi} - R (\sin \gamma_{pi} \sin \varphi_{pc} + \cos \gamma_{pi} \sin \varphi_n);$$

$$Z_{pi} = Z_0 + R \cos \gamma_{pi} + l_{pi} \sin \varphi_n ;$$

где R – радиус ИО, измеренный по вершинам резцов;

$$\gamma_{pi} = \gamma_{pni} + \varphi_{uo} ;$$

φ_{uo} – угол поворота ИО вокруг оси вращения $O_1 O_2$;

l_{pi} – см. рис. 3.

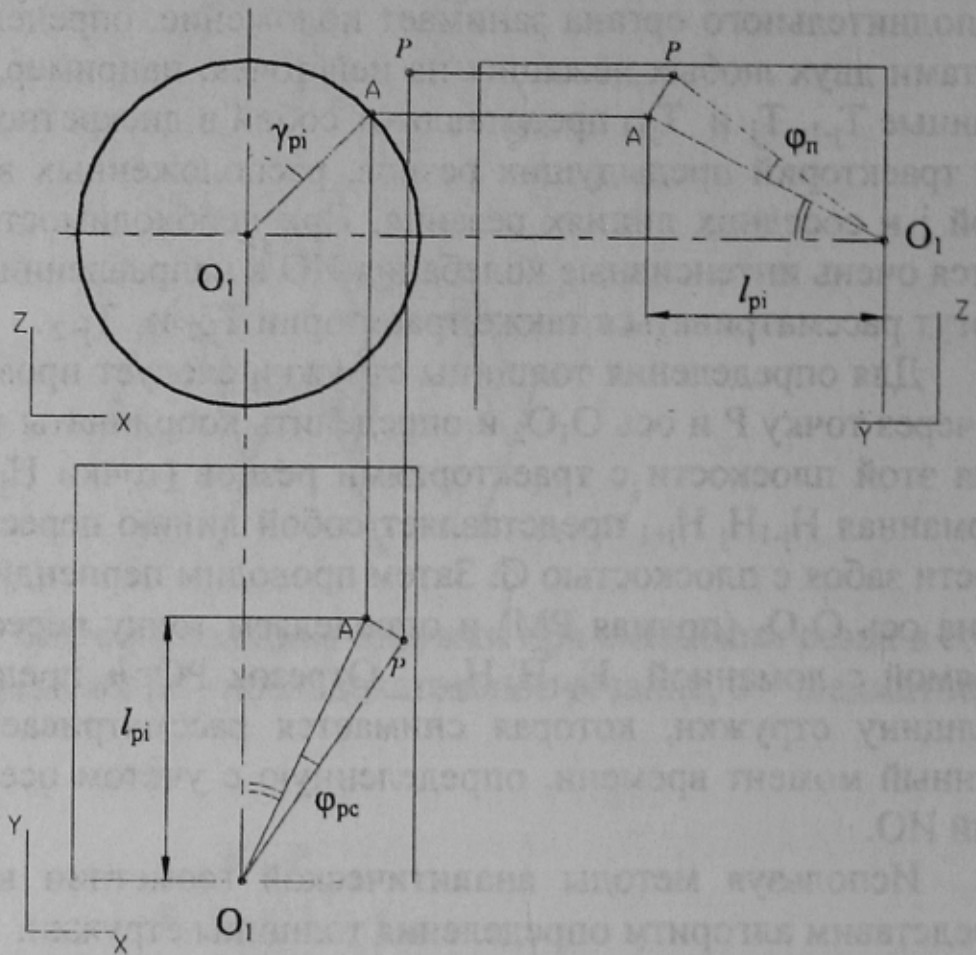


Рисунок 3. – Схема для определения координат вершины резца (точка P).

Уравнения оси ИО (прямая $O_1 O_2$) в канонической форме имеют вид:

$$\frac{X - X_0}{\cos \alpha} = \frac{Y - Y_0}{\cos \beta} = \frac{Z - Z_0}{\cos \gamma},$$

где

$$\cos \alpha = \sin \varphi_{pc}; \cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_n - \sin^2 \varphi_{pc}}; \cos \gamma = \sin \varphi_n.$$

Плоскость G , проведенная через точка P и прямую $O_1 O_2$, описывается уравнением

$$AX + BY + CZ + D = 0, \quad (1)$$

где

$$A = \cos \beta; B = -\cos \alpha - \lambda \cos \gamma; C = \lambda \cos \beta;$$

$$D = Y_O \cos \alpha - X_O \cos \beta + \lambda(Y_O \cos \gamma - Z_O \cos \beta);$$

$$\lambda = -\frac{(X_{Pi} - X_O) \cos \beta - (Y_{Pi} - Y_O) \cos \alpha}{(Z_{Pi} - Z_O) \cos \beta - (Y_{Pi} - Y_O) \cos \gamma}.$$

Определим координаты точек H_{j-1} , H_j и H_{j+1} пересечения траекторий предыдущих резцов в рассматриваемой и соседних линиях резания с плоскостью G . Для этого алгоритмом должно быть предусмотрено запоминание в виде числовых массивов ранее полученных значений $X_O, Y_O, Z_O, \varphi_n, \varphi_{pc}, \varphi_u$ за период времени $T / n_{пл}$, где T — время одного оборота ИО, $n_{пл}$ — число резцов в рассматриваемой линии резания. С помощью этих массивов и параметров схемы набора резцов могут быть определены координаты X_k, Y_k, Z_k точек, образующих траектории всех резцов исполнительного органа.

Для рассматриваемой линии резания последовательно определяем расстояние от каждой k -ой точки траектории предыдущего резца до плоскости G :

$$d_k = \frac{AX_k + BY_k + CZ_k + D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}.$$

Точка пересечения H_j находится между двумя соседними точками с порядковыми номерами m и $m-1$ и координатами, соответственно, X_m, Y_m, Z_m и $X_{m-1}, Y_{m-1}, Z_{m-1}$, имеющими различные знаки расстояния до плоскости G , то есть для которых выполняется условие $d_m d_{m-1} \leq 0$. Прямая, проходящая через эти точки, описывается системой уравнений

$$A_1 X + B_1 Y + D_1 = 0;$$

$$B_2 Y + C_2 Z + D_2 = 0;$$

где $A_1 = Y_m - Y_{m-1}; B_1 = -(X_m - X_{m-1}); D_1 = -X_{m-1}(Y_m - Y_{m-1}) + Y_{m-1}(X_m - X_{m-1});$

$$B_2 = Z_m - Z_{m-1}; C_2 = -(Y_m - Y_{m-1}); D_2 = Z_{m-1}(Y_m - Y_{m-1}) - Y_m(Z_m - Z_{m-1});$$

Координаты точки H_j определяются как решение системы трех уравнений (1) и (2):

$$X_{Hj} = D_X / D_o; \quad Y_{Hj} = D_Y / D_o; \quad Z_{Hj} = D_Z / D_o;$$

где

$$D_O = \begin{vmatrix} A & B & C \\ A_1 & B_1 & 0 \\ 0 & B_2 & C_2 \end{vmatrix}; D_X = \begin{vmatrix} D & B & C \\ D_1 & B_1 & 0 \\ D_2 & B_2 & C_2 \end{vmatrix}; D_Y = \begin{vmatrix} A & D & C \\ A_1 & D_1 & 0 \\ 0 & D_2 & C_2 \end{vmatrix};$$

$$D_Z = \begin{vmatrix} A & B & D \\ A_1 & B_1 & D_1 \\ 0 & B_2 & D_2 \end{vmatrix}.$$

Аналогічно визначаються координати точок H_{j-1} і H_{j+1} , а також, при необхідності, H_{j-2} і H_{j+2} .

Уравнение площини G_1 , проведеної через точку P перпендикулярно осі $O_1 O_2$ має вигляд

$$A_3 X + B_3 Y + C_3 Z + D_3 = 0, \quad (3)$$

де $A_3 = \cos \alpha$; $B_3 = \cos \beta$; $C_3 = \cos \gamma$;
 $D_3 = -(X_{Pi} \cos \alpha + Y_{Pi} \cos \beta + Z_{Pi} \cos \gamma)$.

Послідовно визначаємо відстань від кожної з точок H_{j-2} , H_{j-1} , ... H_{j+2} до площини G_1 :

$$d_{Hl} = \frac{A_3 X_{Hl} + B_3 Y_{Hl} + C_3 Z_{Hl} + D_3}{\sqrt{A_3^2 + B_3^2 + C_3^2}},$$

де $l = j-2, j-1, \dots, j+2$.

Після кожного кроку визначення відстані d_{Hl} , починаючи з другого, перевіряється виконання умови

$$d_{Hl} d_{H,l+1} \leq 0, \quad (4)$$

геометричний зміст якого заключається в тому, що сусідні точки H_l і H_{l+1} розташовані по різні сторони від площини G_1 . Якщо умова (4) виконується, знаходимо рівняння прямої, що проходить через ці точки:

$$\begin{aligned} A_4 X + B_4 Y + D_4 &= 0; \\ B_5 Y + C_5 Z + D_5 &= 0; \end{aligned} \quad (5)$$

де $A_4 = Y_{H,l+1} - Y_{Hl}$; $B_4 = -(X_{H,l+1} - X_{Hl})$;
 $D_4 = -X_{Hl} (Y_{H,l+1} - Y_{Hl}) + Y_{Hl} (X_{H,l+1} - X_{Hl})$;
 $B_5 = Z_{H,l+1} - Z_{Hl}$; $C_5 = -(Y_{H,l+1} - Y_{Hl})$;
 $D_5 = Z_{Hl} (Y_{H,l+1} - Y_{Hl}) - Y_{Hl} (Z_{H,l+1} - Z_{Hl})$;

Координати точки Q визначаються як рішення системи трьох рівнянь (3) і (5):

$$X_Q = D_{Xl} / D_{ol}; \quad Y_Q = D_{Yl} / D_{ol}; \quad Z_Q = D_{Zl} / D_{ol};$$

де

$$D_{O1} = \begin{vmatrix} A_3 & B_3 & C_3 \\ A_4 & B_4 & 0 \\ 0 & B_5 & C_5 \end{vmatrix}; D_{X1} = \begin{vmatrix} D_3 & B_3 & C_3 \\ D_4 & B_4 & 0 \\ D_5 & B_5 & C_5 \end{vmatrix}; D_{Y1} = \begin{vmatrix} A_3 & D_3 & C_3 \\ A_4 & D_4 & 0 \\ 0 & D_5 & C_5 \end{vmatrix};$$

$$D_{Z1} = \begin{vmatrix} A_3 & B_3 & D_3 \\ A_4 & B_4 & D_4 \\ 0 & B_5 & D_5 \end{vmatrix}.$$

Толщина стружки определяется как расстояние между точками Р и Q:

$$h_i = \sqrt{(X_{Pi} - X_Q)^2 + (Y_{Pi} - Y_Q)^2 + (Z_{Pi} - Z_Q)^2}. \quad (6)$$

Для резцов из крайних (а также соседних с ними) линий резания может возникнуть ситуация, когда все точки H_j располагаются с одной стороны от плоскости G_1 , то есть условие (4) не выполняется. В этом случае толщина стружки определяется как длина отрезка RH_N (для кутковых резцов) либо RH_1 (для забойных резцов), где N – число линий резания на исполнительном органе, нумерация которых принята, начиная от завальной стороны органа.

Выводы и направления дальнейших исследований. Таким образом, выше представлены математическая модель и алгоритм, позволяющие в процессе имитационного моделирования рабочего процесса горного комбайна определять толщину стружки на каждом из резцов исполнительного органа с учетом его колебаний в направлении оси вращения. Полученные значения толщины стружки могут использоваться с целью определения по известным методикам [1] сил на резцах ИО, при суммировании которых с силами погрузки получают параметры главного вектора и главного момента внешних сил, действующих на исполнительный орган.

Список источников:

1. Моделирование процесса разрушения углей режущими инструментами // М. : Наука, 1981. – 181с.
2. Горбатов П.А. Имитационное моделирование динамических процессов в очистных комбайнах, функционирующих в автономных системах «комбайн-массив – конвейер» // Разработка МПИ - Киев: Техника, 1991. вып.88.-С. 26-31.
3. Семенченко Д.А. Обоснование параметров исполнительного органа проходческого комбайна с аксиальными коронками. Донецк, ДонНТУ, 2003, с.158.
4. Гандрих Г.Н. Исследование движения шнеков очистных комбайнов и его влияние на сортность угля // Технология добычи угля подземным способом. - 1976. -№ 5. - С. 24-26.
5. Плюм Д. Присечка пород и пересечение зон геологических нарушений шнековыми комбайнами // Глюкауф.-1987.-№ 23. - С. 17-21.