

OPTIMIZATION OF THE INSTALLATION ANGLE OF THE CUTTER OF THE PEAT EDGE CUTTER FROM THE POSITION OF ENERGY INTENSITY OF MILLING

A.L. YABLONEV, Dr. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: alvovich@mail.ru

Peat extraction by milling involves layer-by-layer surface treatment of karst fields. At the same time, the channel strips due to high humidity and reduced load-bearing capacity turn out to be untreated, edges appear that make it difficult to remove moisture from the surfaces of fields and the operation of technological equipment. This problem can be solved by treating the surfaces of the fields with special eyebrow cutters. However, existing models of brow cutters process only one brow in one pass. The concept of a peat brow cutter developed by us, capable of processing both edges of the fields adjacent to the cart channel in one pass, required experimental studies to establish the optimal angle of rotation of the cutter relative to the transverse axis of the machine. In the presented study, which contains the methodology and experimental results, the value of this angle is justified from the perspective of the optimal energy intensity of milling a peat deposit.

Keywords: peat production field, edge cutter, oblique milling, peat field channel, energy intensity, strain gauging, load cell.

Поступила в редакцию/received: 09.01.2024; после рецензирования/revised: 24.01.2024;
принята/accepted: 30.01.2024

УДК 622.232.7

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕКТОРА ВНЕШНЕГО ВОЗМУЩЕНИЯ НА ОСЕВОЙ КОРОНКЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА

О.Е. ШАБАЕВ¹, д-р. техн. наук, А.Ю. ДОВГАНЬ^{1,2}, аспирант

¹Донецкий национальный технический университет,
283001, Донецк, ул. Артема, 58, e-mail: donntu.info@mail.ru

²ГУ «Автоматгормаш им. В.А. Антипова»,
283003, Донецк, пр. Ильича, 93, e-mail: avtomatgormash@mail.ru

© Шабает О.Е., Довгань А.Ю., 2024

Разработана комплексная модель формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке исполнительного органа, учитывающая влияние горно-геологических условий и режимных параметров работы комбайна на процесс разрушения горного массива, которая состоит из моделей разрушаемого массива и поверхности забоя, нахождения координат вершины резца в забое, оценки условия контактирования резца с массивом, определения параметров процесса разрушения массива резцами коронки для определения усилий резания и подачи на резце с учетом

выполнения условия контакта резца с забоем. Адекватность математической модели оценивалась путем сравнения показателей, полученных в ходе модельных и экспериментальных исследований: средней мощности на разрушение за цикл, теоретической производительности, удельных энергозатрат за цикл, длительности обработки забоя.

Ключевые слова: математическая модель, проходческий комбайн, резец, исполнительный орган, вектор внешнего возмущения.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-2-55-72

ВВЕДЕНИЕ

Своевременная подготовка новых забоев и магистральных выработок требует повышения темпов проходки. Так, по данным исследователей ДонУГИ среднемесячное подвигание линии действующих очистных забоев на шахтах ДНР составляет до 68,3 м/мес., при этом скорость проведения подготовительных выработок не превышает 45,6 м/мес. На шахтах ДНР применяются проходческие комбайны стреловидного типа как с продольно-осевыми коронками (ГПКС, КСП-32, КСП-35, EBZ-160), так и с поперечно-осевыми (КПД). Наибольшее распространение (75,3 %) получили проходческие комбайны серии КСП производства ООО «НПО «Ясиноватский машиностроительный завод».

Экспериментальные исследования нагрузочных характеристик двигателя привода исполнительного органа комбайна КСП-35 в представительных условиях его эксплуатации позволили выявить значительную неравномерность значений характеристик рабочего процесса, обусловленную смещением машины относительно продольной оси выработки вследствие погрешностей ручного управления. Так, средняя за цикл обработки забоя мощность двигателя изменяется от 41,9 до 76,5 кВт, производительность – от 0,147 до 0,304 м³/мин, а удельные энергозатраты – в пределах от 2,4 до 6,96 кВт · ч/м³ [1]. Смещение проходческого комбайна от продольной оси выработки в ту или иную сторону обуславливает изменение глубины зарубки в процессе горизонтального реза, увеличение переборов породы, что приводит к изменению спектра нагрузок на исполнительном органе и, как следствие, к снижению ресурса элементов трансмиссии на 64 % [2]. Это вызывает необходимость анализа режимов работы исполнительного органа проходческого комбайна, оснащенного осевой коронкой, в ручном режиме управления и разработки математической модели формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке при ее взаимодействии с горным массивом в режиме послойного разрушения горизонтальными резами и смещение комбайна относительно продольной оси выработки. Математическая модель вектора внешнего возмущения необходима для выполнения на ее основе теоретических исследований по установлению закономерностей влияния смещения проходческого комбайна относительно продольной оси выработки на показатели эффективности его работы и ресурс элементов трансмиссии.

Разработке математических моделей формирования вектора внешнего возмущения на исполнительном органе горных выемочных машин посвящено множество исследований. В частности, в работах [3, 4] содержатся математические модели, описывающие процесс формирования вектора внешнего возмущения на аксиальной коронке, и предложены расчетные схемы для определения вектора внешнего возмущения на аксиальной коронке разных форм, формализации

поверхности забоя и структуры массива. На основе большого числа экспериментальных исследований шнековых, барабанных исполнительных органов, радиальных и аксиальных коронок выявлены основные факторы, определяющие величину и характер изменения составляющих вектора внешнего возмущения, и разработаны математические модели для его описания [5–13]. Работы [11, 14–16] посвящены исследованию динамического функционирования проходческих комбайнов методом математического моделирования. В работе [4] предложен метод разработки имитационных математических моделей рабочих процессов выемочных машин как пространственных многомассовых динамических систем переменной структуры на базе использования наборов функционально законченных элементов (ФЗЭ). При этом комплексная имитационная модель динамического функционирования комбайна представляет собой взаимоувязанную совокупность частных математических моделей ФЗЭ. Существующие математические модели учитывают предыдущие проходы коронки и форму выработанного пространства для определения параметров среза.

Таким образом, процесс формирования вектора внешнего возмущения на аксиальной коронке достаточно хорошо изучен и описан математическими моделями с достаточной степенью достоверности, однако данные математические модели в существующем виде неприменимы в полной мере к проходческому комбайну с осевыми коронкам и требуют уточнения. Кроме того, в указанных работах не учитывается фактор смещения проходческого комбайна после передвижки. Поэтому разработка математической модели формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке исполнительного органа проходческого комбайна при разрушении горного массива является актуальной научной задачей, направленной на повышение эффективности его работы.

Цель работы заключается в создании комплексной модели формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке проходческого комбайна с учетом особенностей его смещения в процессе передвижки, стружкообразования и контактирования резца с забоем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Комплексная математическая модель формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке, учитывающая влияние горно-геологических условий и режимных параметров работы комбайна на процесс разрушения горного массива, состоит из моделей разрушаемого массива и поверхности забоя, определения координат вершины резца в забое, оценки условия контактирования резца с массивом и определения параметров процесса разрушения массива резцами коронки.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ РАЗРУШАЕМОГО МАССИВА И ПОВЕРХНОСТИ ЗАБОЯ

Математическая модель разрушаемого массива используется для учета влияния структуры пласта на формирование вектора внешнего возмущения [4].

Расчетная схема, предложенная авторами [4, с. 44] для разработки математической модели разрушаемого массива, представлена на рис. 1, где показано сечение проходческого забоя, состоящего из трех прослоек с углом падения α_n . Система координат $OXYZ$ жестко связана с забоем. H_1 и H_2 – расстояние по оси OZ до верхней границы соответствующего прослойка. Исходными данными для расчета являются координаты текущего резца (X_i, Y_i, Z_i) в системе координат забоя $OXYZ$.

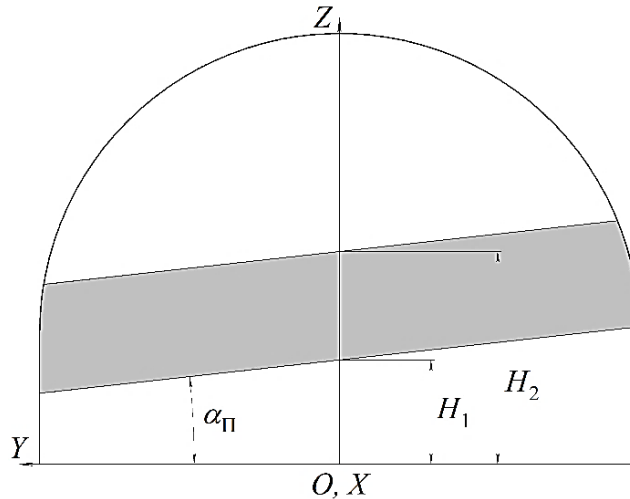


Рис. 1. Расчетная схема для разработки математической модели разрушаемого массива

Математическая модель определения текущего номера прослойка:

$$\begin{cases} l = \overline{1, N_{\pi}} . \\ \text{Если } Z_i < H_l - Y_i \operatorname{tg} \alpha_{\pi}, \\ \text{то } m_i = l, l = N_{\pi}, \end{cases} \quad (1)$$

где l – номер прослойка;

N_{π} – количество разрушаемых прослойков;

H_l – расстояние от почвы выработки до верхней поверхности l -го прослойка вдоль оси OZ ;

m_i – номер прослойка массива, разрушаемого i -м резцом.

В интегрируемом виде математическая модель разрушаемого массива запишется как

$$m_i = \bar{F}_M(\bar{X}_i(X_i, Y_i, Z_i), \bar{P}_M), \quad (2)$$

где \bar{F}_M – вектор-функция определения прослойка массива, разрушаемого i -м резцом;

$\bar{X}_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ – входной вектор, составляющими которого являются координаты вершины резца, разрушающего забой;

$\bar{P}_M\{N_{\pi}, \alpha_{\pi}, H_l, fz_l(\bar{Y}_{pi}), fy_l(\bar{Y}_{pi}), fx_l(\bar{Y}_{pi}), l = \overline{1, N_{\pi}}\}$ – вектор параметров структуры и зависимостей определения составляющих сил резания разрушаемого массива, компонентами которого являются:

$fz_l(\bar{Y}_{pi}), fy_l(\bar{Y}_{pi}), fx_l(\bar{Y}_{pi})$ – зависимости для определения составляющих сил резания, подачи и бокового усилия при разрушении l -го прослойка;

$\bar{Y}_{pi}\{\bar{V}_p, \bar{V}_{\pi}, h_i, t_i\}$ – вектор параметров процесса разрушения массива i -м резцом;

$\bar{V}_p\{V_{py_i}, V_{pz_i}\}$ – скорость резания на i -м резце;

$\bar{V}_{\pi}\{V_{\pi y_i}, V_{\pi z_i}\}$ – скорость подачи на i -м резце.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ РЕЗЦА ОСЕВОЙ КОРОНКИ В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ ВЫРАБОТКИ

Для определения координат вершины i -го резца осевой коронки проходческого комбайна в неподвижной системе координат выработки $OXYZ$ составлена расчетная схема, представленная на рис. 2.

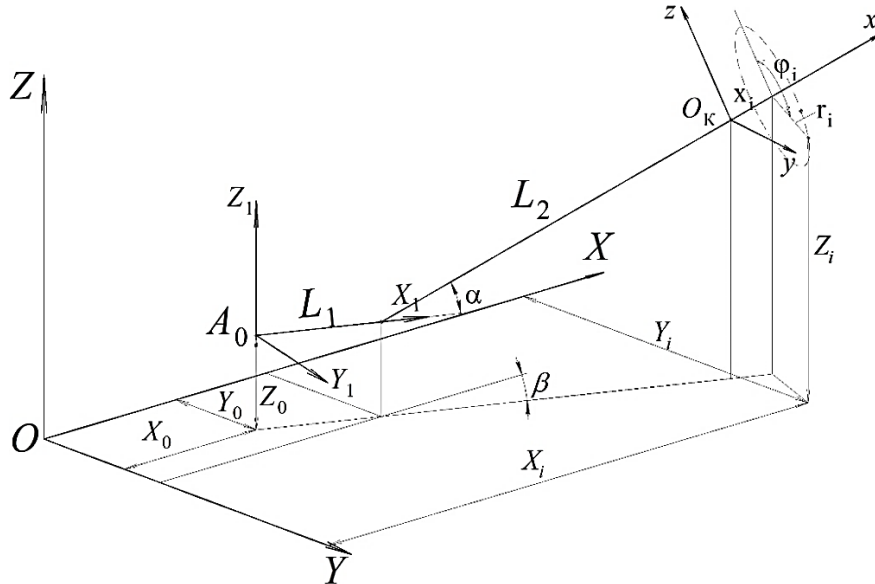


Рис. 2. Расчетная схема для определения координат положения вершины резца осевой коронки в системе координат выработки

На рис. 2 показано положение исполнительного органа в неподвижной системе координат $OXYZ$, жестко связанной с забоем, при его повороте в горизонтальной плоскости относительно оси поворотной турели, проходящей через точку A_0 на угол β , и подъеме стрелы длиной L_2 в вертикальной плоскости на угол α (L_1 – расстояние между осями поворота стрелы в горизонтальной и вертикальной плоскостях). Локальная система координат (ЛСК) $A_0X_1Y_1Z_1$ жестко связана с корпусом проходческого комбайна. Система координат O_kxyz жестко связана со стрелой. Ось O_kx направлена вдоль оси стрелы и совпадает с осью вращения коронки. Ось O_kz находится в вертикальной плоскости, точка O_k – в основании коронки. Положение резца в системе координат O_kxyz задано его параметрами в схеме набора: радиусом установки r_i , углом поворота φ_i и смещением вдоль оси коронки x_i .

Математическая модель определения координат вершины резца в ЛСК $A_0X_1Y_1Z_1$ согласно расчетной схеме, приведенной на рис. 2, имеет вид

$$\begin{cases} X_{1i} = (L_1 + (L_2 + x_i) \cos \alpha) \cos \beta, \\ Y_{1i} = (L_1 + (L_2 + x_i) \cos \alpha + r_i \sin \varphi_i) \cos \beta, \\ Z_{1i} = (L_2 + x_i) \sin \alpha + r_i \cos \varphi_i \cos \alpha. \end{cases} \quad (3)$$

Для определения координат i -го резца (X_i, Y_i, Z_i) в неподвижной системе координат выработки после передвижки комбайна необходимо ввести матрицу

направляющих косинусов, определяющих комбинацию последовательных поворотов вокруг осей вращающейся системы координат:

$$(X_i, Y_i, Z_i) = R \cdot \begin{bmatrix} X_{1i} \\ Y_{1i} \\ Z_{1i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{0x} + \Delta X \\ A_{0y} + \Delta Y \\ A_{0z} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $R = R_Z(\varphi) \cdot R_X(\theta) \cdot R_Z(\psi)$ – матрица направляющих косинусов;

ΔY – смещение проходческого комбайна относительно продольной оси выработки после передвижки;

ΔX – передвижка комбайна вдоль оси выработки.

В интегрированном виде математическая модель определения координат вершины резца в забое запишется в виде

$$\bar{X}_i = \bar{F}_{пр}(\bar{X}_{пр}, \bar{P}_{сп}), \quad (5)$$

где $\bar{F}_{пр}$ – вектор функции определения координат положения резца в пространстве забоя;

$\bar{X}_{пр}(L_2, \alpha, \beta, x_i, \varphi_i, r_i)$ – входной вектор, компонентами которого являются длина стрелы L_2 и параметры ее положения (α, β), а также параметры вершины резца (r_i, φ_i, x_i) в системе $O_{кхуз}$;

$\bar{P}_{сп}\{L_1, A_{0x}, A_{0y}, A_{0z}\}$ – вектор параметров системы подвески рабочего органа.

УСЛОВИЕ КОНТАКТА РЕЗЦА С ЗАБОЕМ

Наряду с параметрами разрушаемого массива на величину и характер изменения нагрузок, действующих на исполнительный орган при его взаимодействии с разрушаемым массивом, определяющее влияние оказывают величина и форма обрабатываемого сечения. От этих характеристик зависит количество резцов, одновременно участвующих в разрушении массива, а также начало и длительность формирования нагрузки на каждом резце. Поэтому необходимо составить математическую модель оценки контактирования резца с разрушаемым массивом с учетом поверхности забоя, образованной предшествующими горизонтальными резами после зарубки вверх и после зарубки вниз.

Для определения контакта резца с забоем в режиме горизонтального реза была разработана расчетная схема (рис. 3).

На рис. 3 приняты следующие обозначения:

M_p – часть массива, разрушенная предыдущим горизонтальным проходом;

M – массив, подлежащий разрушению;

1-2 и 3-4 – отрезки, на которых расположены центры окружностей, ограничивающих боковую поверхность (куток забоя) разрушенного массива после j -го бокового реза предыдущего цикла;

O'_n и R_n – центр и радиус окружности, ограничивающей поверхность забоя для этого резца после j -го бокового реза предыдущего цикла;

β_{1j}, β_{2j} и α_j – углы предельного положения стрелы в горизонтальной плоскости и угол ее подъема при реализации j -го бокового реза;

L_k – длина коронки проходческого комбайна по оси вращения.

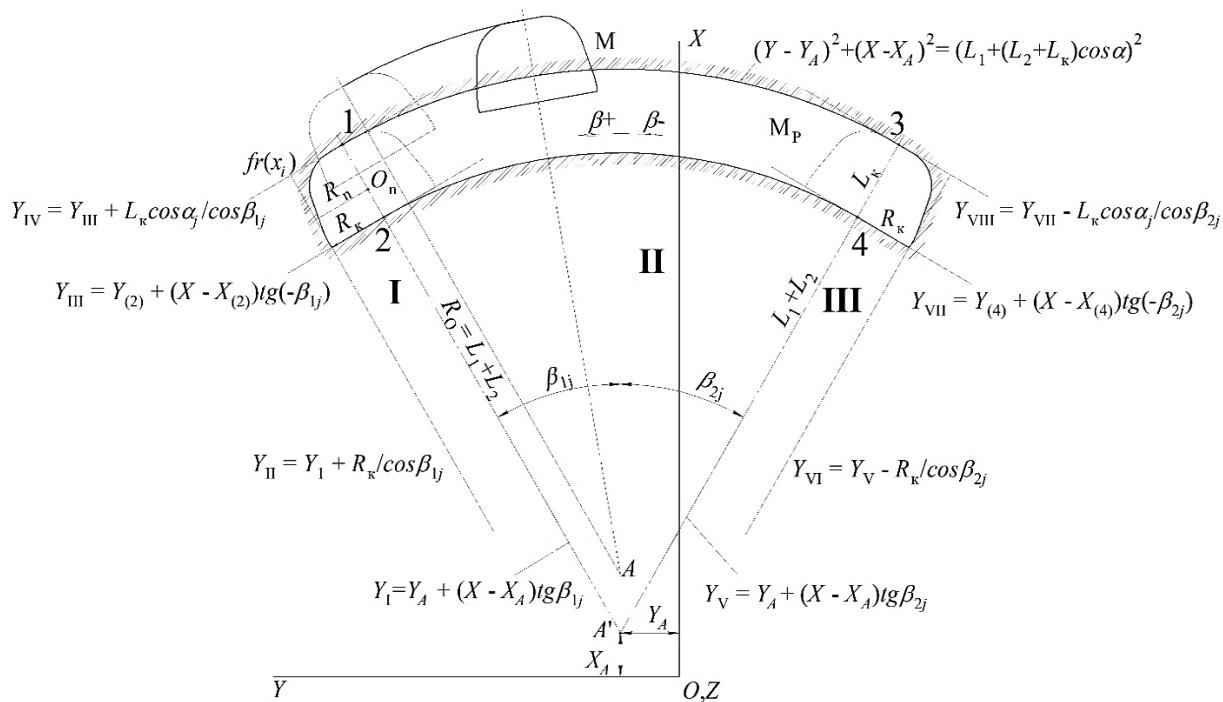


Рис. 3. Расчетная схема для определения контакта резца с забоем

Сечение тела вращения исполнительного органа при прохождении горизонтального реза частично повторяет форму коронки (заштрихованная область на рис. 4). Как видно из рис. 4, при фрезеровании исполнительный орган проходческого комбайна формирует горизонтальными резами в плоскости XOZ ограничивающую дугу радиусом $(L_2 + L_k)$ в секторе, доступном стреле по оси Z .

На рис. 4 приняты следующие обозначения:

$\alpha_1, \alpha_2 (\alpha'_1, \alpha'_2, \alpha'_3, \alpha'_n)$ – угол подъема стрелы для j -го реза в рассматриваемом (предшествующем) цикле разрушения;

$A_0 (A)$ – положение оси поворотной турели в рассматриваемом (предшествующем) цикле обработки забоя;

$O_1, O_2 (O'_1, O'_2, O'_3, O'_n)$ – положения начала координат $OXYZ$ в рассматриваемом (предшествующем) цикле при последовательной схеме обработки забоя.

Для оценки контактирования резца с забоем ограничивающая поверхность выработанного массива аппроксимируется поверхностями, образованными телами вращения при прохождении исполнительным органом проходческого комбайна горизонтальных резов с соответствующими углами подъема и поворота стрелы. В общем случае число таких поверхностей зависит от шага фрезерования.

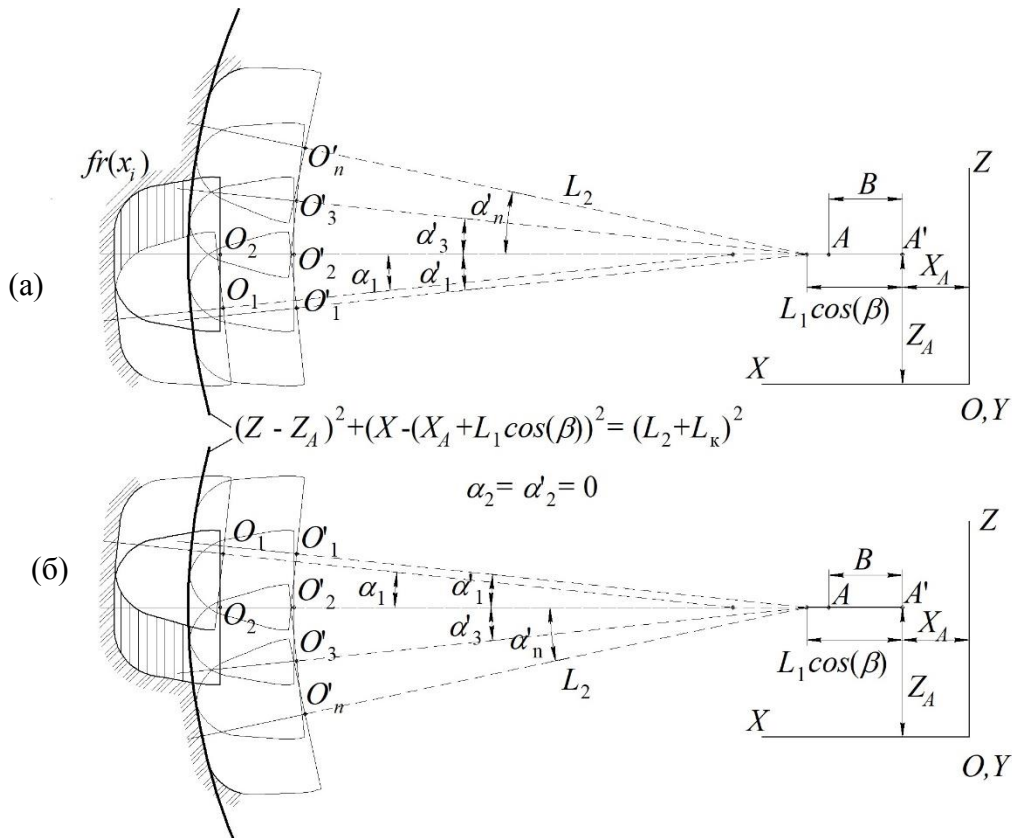


Рис. 4. Параметры задания поверхности забоя при боковом резе после зарубки вверх (а) и после зарубки вниз (б) (последовательная схема обработки)

Условие контакта резца с забоем в общем виде может быть записано следующим образом:

$$(X_i + X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2 + (Z_i - Z_0)^2 \geq R^2, \quad (6)$$

где (X_0, Y_0, Z_0) – координаты центра ограничивающей сферической поверхности радиусом R .

С учетом ограничений на основании расчетных схем, приведенных на рис. 3 и 4, составлена математическая модель определения логического состояния (0; 1) признака контактирования i -го резца при j -м горизонтальном проходе с разрушаемым массивом:

$$\left. \begin{array}{l}
j = \overline{1, n} \\
\text{Сектор II:} \\
Y_I = Y_A + (X_{ij} - X_A) \operatorname{tg} \beta_{1j}; Y_V = Y_A + (X_{ij} - X_A) \operatorname{tg} \beta_{2j}; \\
\text{если } (Y_V \leq Y_{ij} \leq Y_I), \text{ то} \\
\{\beta = \operatorname{arctg}((Y_{ij} - Y_A)/(X_{ij} - X_A)); R_1 = L_2 + L_K; \\
\alpha = \arcsin\left(\frac{Z_{ij}}{L_2 + L_K}\right); \varphi_{\Delta H} = \arccos\left(\frac{R_K - \Delta H}{R_K}\right); R_2 = L_1 + (L_2 + L_K) \cos \alpha; \\
Z_K(X_{ij}) = \begin{cases} \frac{(X_{ij} - X_{(k-1, j-1)})(Z_{(k, j-1)} - Z_{(k-1, j-1)})}{(X_{(k, j-1)} - X_{(k-1, j-1)})} + Z_{(k-1, j-1)} \\ \text{для } k \in [2, n], X_{(k-1, j-1)} \leq X_{ij} < X_{(k, j-1)} \end{cases} \\
\text{go to M1}\} \\
\\
\text{Сектор I:} \\
Y_{II} = Y_I + R_K / \cos \beta_{1j}; Y_{III} = Y_{(2)} + (X_{ij} - X_{(2)}) \operatorname{tg}(-\beta_{1j}); \\
Y_{IV} = Y_{III} + L_K \cos \alpha_j / \cos \beta_{1j}; \\
\text{если } (Y_{II} < Y_i < Y_{III}) \wedge (Y_{III} < Y_i < Y_{IV}), \text{ то} \\
\{x_R = ((X_i - X_{(2)}) / \cos \beta_{1j} + (Y_i - Y_A - (X_i - X_A) \operatorname{tg} \beta_{1j}) \sin \beta_{1j}) / \cos \alpha_j; \\
X_{(2)} = X_A + (L_1 + L_2 \cos \alpha_j) \cos \beta_{1j}; Y_{(2)} = Y_A + (L_1 + L_2 \cos \alpha_j) \sin \beta_{1j}; \\
X_{O_j} = X_{(2)} + x_R \cos \alpha_j \cos \beta_{1j}; Y_{O_j} = Y_{(2)} + x_R \cos \alpha_j \sin \beta_{1j}; \\
Z_{O_j} = Z_A + (L_2 + x_R) \sin \alpha_j; R = Y_K(x_R); \text{ go to M2}\} \\
\\
\text{Сектор III:} \\
Y_{VI} = Y_V - R_K / \cos \beta_{2j}; Y_{VII} = Y_{(4)} + (X_{ij} - X_{(4)}) \operatorname{tg}(-\beta_{2j}); \\
Y_{VIII} = Y_{VII} - L_K \cos \alpha_j / \cos \beta_{2j}; \\
\text{если } (Y_{VI} < Y_i < Y_V) \wedge (Y_{VIII} < Y_i < Y_{VII}), \text{ то} \\
\{x_R = ((X_i - X_{(4)}) / \cos \beta_{2j} + (Y_i - Y_A - (X_i - X_A) \operatorname{tg} \beta_{2j}) \sin \beta_{2j}) / \cos \alpha_j; \\
X_{(4)} = X_A + (L_1 + L_2 \cos \alpha_j) \cos \beta_{2j}; Y_{(4)} = Y_A + (L_1 + L_2 \cos \alpha_j) \sin \beta_{2j}; \\
X_{O_j} = X_{(4)} + x_R \cos \alpha_j \cos \beta_{2j}; Y_{O_j} = Y_{(4)} + x_R \cos \alpha_j \sin \beta_{2j}; R = Y_K(x_R); \\
Z_{O_j} = Z_A + (L_2 + x_R) \sin \alpha_j; \text{ go to M2}\} \\
\\
\text{M1: Если } \begin{cases} (X_{ij} - (X_A + L_1 \cos \beta))^2 + (Z_{ij} - Z_A)^2 \geq R_1^2, \\ (X_{ij} - X_A)^2 + (Y_{ij} - Y_A)^2 \geq R_2^2, \\ Z_K(X_{ij}) \geq Z_K(X_{ij-1}), \\ 0 \leq \varphi_{ij} \leq \varphi_{\Delta H_j}, \end{cases} \\
\text{то } a = 1, j = j + 1, \text{ иначе } a = 0, j = n \\
\\
\text{M2: Если } (X_{ij} - X_{O_j})^2 + (Y_{ij} - Y_{O_j})^2 + (Z_{ij} - Z_{O_j})^2 \geq R^2, \\
\text{то } a = 1, j = j + 1, \text{ иначе } a = 0, j = n.
\end{array} \right\} \quad (7)$$

В интегрированном виде математическая модель определения величины α запишется как

$$\alpha = \bar{F}_{\text{кр}}(\bar{X}_i, \bar{P}_{\text{кр}}), \quad (8)$$

где α – величина признака контактирования резца с разрушаемым массивом (при $\alpha = 1$ резец контактирует с забоем, при $\alpha = 0$ не контактирует);

$\bar{F}_{кр}$ – вектор-функция определения величины признака контактирования резца с массивом;

$\bar{P}_{кр}(L_{ст}, R_0, R_k, fr(x), N_n, \beta_{1n}, \beta_{2n}, \alpha_n, X_{An}, Y_{An}, Z_{An}, n = \overline{1, N_n})$ – вектор параметров для оценки условия контактирования резца с массивом.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ МАССИВА РЕЗЦАМИ КОРОНКИ

Резцовый исполнительный орган разрушает забой резцами в определенной последовательности, в результате чего образуется схема стружкообразования, определяющая параметры среза – толщину стружки h_i и шаг резания t_i – на каждом резце, контактирующем с забоем. Для их определения необходимо знать траектории движения резцов, образующих забой для рассматриваемого i -го резца (всего n_p резцов на коронке).

Для разработки математической модели определения толщины и ширины среза для осевой коронки в процессе разрушения массива были приняты следующие исходные положения [4]:

толщина среза резца определяется как расстояние до поверхности разрушаемого массива, формируемой резцами опережающей лопасти в сечении забоя плоскостью, проходящей через вершину резца и ось вращения коронки;

ширина среза резца определяется как расстояние между вершиной резца и вершиной опережающего резца (находящегося на соседних линиях резания) в сечении забоя плоскостью проходящей через его вершину и ось вращения коронки.

С учетом этих принятых положений была разработана расчетная схема для определения параметров среза – толщины и ширины – на каждом резце (рис. 5). На схеме показаны:

$OXYZ$ – неподвижная система координат, жестко связанная с забоем;

$OX'Y'Z'$ – неподвижная система координат, совпадающая с положением системы $OXYZ$ при ее повороте вокруг оси OZ на угол поворота стрелы в горизонтальной плоскости;

$O_{кхуз}$ – система координат, жестко связанная с осью вращения коронки, оси которой параллельны осям системы координат $OX'Y'Z'$;

A_i-A_i – сечение забоя в рассматриваемой момент времени плоскостью, проходящей через вершину i -го резца и ось вращения коронки;

$O_{крx}$ – система координат, задающая положение i -го резца и резцов, формирующих поверхность забоя в сечении A_i-A_i и определяющих параметры среза;

L_i – лопасть коронки, на которой установлен i -й и опережающий резец в соседней линии резания;

L'_i – опережающая лопасть, на которой установлены резцы, формирующие поверхность забоя для i -го резца в сечении A_i-A_i ;

a_0 и a_0' , b_0' – положения вершины опережающего резца и резцов, формирующих поверхность забоя для этого резца в опережающей лопасти в рассматриваемый момент времени;

a и a' , b' – положения вершин резцов, формирующих поверхность забоя для i -го резца в сечении A_i-A_i ;

$r_i, R_{1i}, R_{2i}, R_{3i}$ и $x_i, X_{1i}, X_{2i}, X_{3i}$ – координаты вершин i -го резца и резцов, формирующих поверхность забоя в сечении A_i-A_i ;

С учетом приведенной выше расчетной схемы математическая модель определения параметров процесса разрушения массива резцами осевой коронки в режиме бокового реза может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned}
 & i \in \overline{[1, N-1]} \\
 & L_3 = L_1 + L_2 \cos \alpha; \omega_\beta = \frac{V_{\text{п}}}{60(L_1+L_2)}; V_{\text{пр}} = \omega_\beta L_3; t_{\text{об}} = 60/\omega_\kappa; \\
 & \text{для } \varphi_{i+1} < \varphi_i: \varphi_{i+1} = 2\pi + \varphi_{i+1}; \text{ для } \varphi'_i < \varphi_i: \varphi'_i = 2\pi + \varphi'_i; \\
 & \Delta\varphi_p = \varphi_{i+1} - \varphi_i; \Delta\varphi_\lambda = \varphi'_i - \varphi_i; \\
 & t_{\text{стр}} = \begin{bmatrix} t_{\text{об}} \cdot \Delta\varphi_p / 2\pi \\ t_{\text{об}} \cdot \Delta\varphi_\lambda / 2\pi \\ t_{\text{об}} \cdot (\Delta\varphi_p + \Delta\varphi_\lambda) / 2\pi \end{bmatrix}; \\
 & k \in \overline{[1, 3]} \\
 & l_{\text{стр}k} = V_{\text{пр}} \cdot t_{\text{стр}k}; \beta_{\text{стр}k} = 180 \cdot l_{\text{стр}k} / \pi \cdot L_3; \\
 & R_{ki} = \sqrt{r_{ki}^2 - (L_3 \sin \beta_{\text{стр}k} \cos \varphi_i)^2} - L_3 \sin \beta_{\text{стр}k} \sin \varphi_i; \\
 & X_{ki} = x_{ki} - \sqrt{2(L_3)^2 - 2L_3^2 \cos \beta_{\text{стр}k} \sin \frac{\beta_{\text{стр}k}}{2}}; \\
 & t_i = \sqrt{(r_i + R_{1i})^2 + (X_i + X_{1i})^2}; \delta_i = \arccos \left(\frac{R_{2i} - R_{3i}}{\sqrt{(R_{2i} - R_{3i})^2 + (X_{2i} - X_{3i})^2}} \right); \\
 & h_i = (r_i - R_{3i}) \sin \delta_i + (x_i - X_{3i}) \cos \delta_i; S = h_i \cdot t_i; \\
 & \begin{bmatrix} V_{X_i} \\ V_{Y_i} \\ V_{Z_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -((L_1 + (L_2 + x_i) \cos \alpha) \cos \beta) \cdot \omega_\beta \cdot \sin \beta \\ ((L_1 + (L_2 + x_i) \cos \alpha) \cos \beta) \cdot \omega_\beta \cdot \sin \beta + r_i \omega_\kappa \cos \varphi_i \\ -r_i \omega_\kappa \sin \varphi_i \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

В интегрированном виде математическая модель определения параметров процесса разрушения массива аксиальной коронкой как ФЗЭ запишется как

$$\bar{Y}_p = \bar{F}_p(\bar{X}_p(\bar{Y}_{\text{сн}}, \bar{R})), \tag{10}$$

где $\bar{Y}_p = (h_i, t_i, i = \overline{1, N_1})$ – выходной вектор параметров процесса разрушения массива резцами осевой коронки;

\bar{F}_p – вектор функция определения параметров процесса разрушения массива резцами лопасти осевой коронки;

$\bar{X}_p(\bar{Y}_{\text{сн}}, \bar{R})$ – входной вектор, компонентами которого являются схема набора резового инструмента коронки $\bar{Y}_{\text{сн}}$ и вектор параметров режима ее работы $\bar{R}(L_1, \alpha, \beta, \omega_\kappa, V_{\text{п}}, \omega_\beta)$;

Зависимости (1), (2), (8), (9) являются составными частями комплексной математической модели формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕКТОРА
ВНЕШНЕГО ВОЗМУЩЕНИЯ НА ОСЕВОЙ КОРОНКЕ
КАК ФУНКЦИОНАЛЬНО ЗАКОНЧЕННЫЙ ЭЛЕМЕНТ**

Путем объединения приведенных выше зависимостей можно составить комплексную математическую модель формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке (11).

$$\left\{ \begin{array}{l} m_i = \bar{F}_M(\bar{X}_i(X_i, Y_i, Z_i), \bar{P}_M), \\ \bar{X}_i = \bar{F}_{пр}(\bar{X}_{пр}, \bar{P}_{сн}). \\ \text{Условие контакта резца:} \\ \text{Если } \begin{cases} (X_{ij} - (X_A + L_1 \cos \beta))^2 + (Z_{ij} - Z_A)^2 \geq R_1^2; \\ (X_{ij} - X_A)^2 + (Y_{ij} - Y_A)^2 \geq R_2^2; \\ Z_{ij} \geq Z_K(X_{ij}). \end{cases} \\ \text{Если } (X_{ij} - X_{O_j})^2 + (Y_{ij} - Y_{O_j})^2 + (Z_{ij} - Z_{O_j})^2 \geq R^2, \\ \text{то } a = 1, j = j + 1, \text{ иначе } a = 0, j = n; \\ \{h_i, t_i\} = \bar{F}_p(\bar{X}_p(\bar{Y}_{сн}, \bar{R})), \\ \{Z_i, Y_i\} = F_1(P_{zi}, P_{yi}, \bar{r}_i), \\ \{\bar{P}_M, \bar{M}_M\} = F_2(Z_i, Y_i), \end{array} \right. \quad (11)$$

где $F_{пр}$ – вектор-функция расчета положения резца;

F_1 – вектор-функция расчета мгновенных значений усилия на резце;

F_2 – вектор-функция расчета вектора внешнего возмущения на коронке.

ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Адекватность математической модели оценивалась путем сравнения интегральных показателей, отражающих эффективность процесса разрушения горного массива, а именно: средней мощности на разрушение за цикл, теоретической производительности, удельных энергозатрат за цикл, длительности обработки забоя.

При проведении модельного эксперимента по послойному разрушению забойного пространства принимались следующие допущения:

исполнительный орган проходческого комбайна движется строго по заданной траектории без учета переборов в связи с тем, что при определении теоретической производительности в ходе обработки экспериментальных данных площадь выработки принималась по паспорту выработки;

крепость породы и угля не изменяется в пределах прослойка и соответствует принятым значениям.

На рис. 6 приведена структура проходческого забоя, принятого при моделировании.

Расчетные значения показателей эффективности работы проходческого комбайна за цикл обработки забоя определены на основе разработанной математической модели при исходных данных, соответствующих условиям шахтного эксперимента (табл. 1) [1].

В качестве исходных данных для сравнения с результатами моделирования принимались экспериментальные данные, соответствующие циклу разрушения забоя со смещением комбайна в пределах коридора ± 50 мм. На рис. 7 приведены данные

циклов разрушения при шахтном эксперименте [1] в порядке убывания теоретической производительности за цикл.

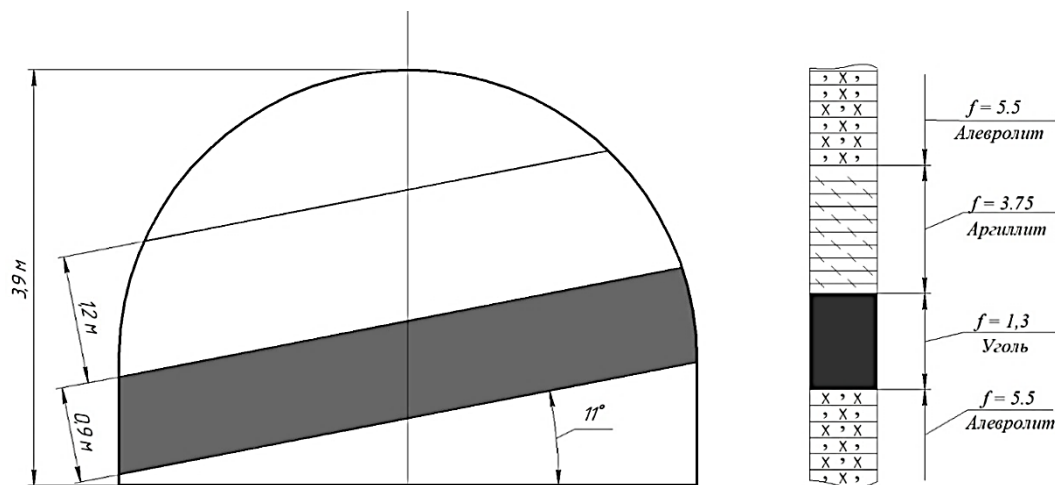
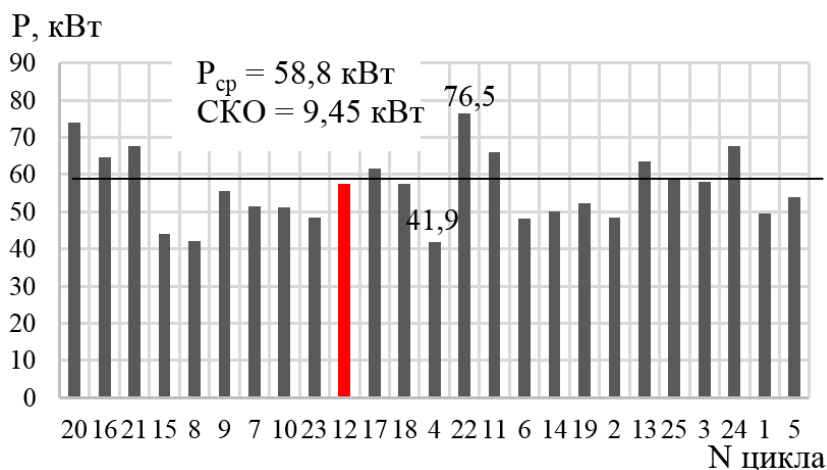


Рис. 6. Структура пород проходческого забоя для математического моделирования

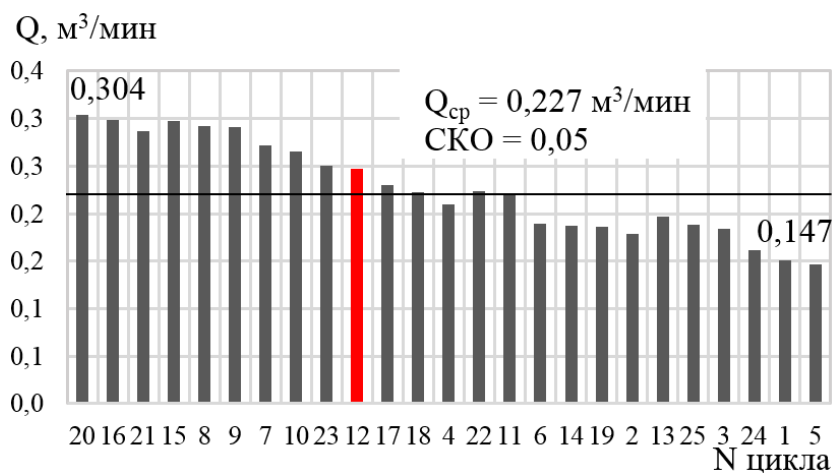
Таблица 1. Исходные данные для расчета показателей эффективности проходческого комбайна

Наименование параметра	Значение
Глубина зарубки B , м	0,325
Шаг фрезерования ΔH , м	0,4
Контактная прочность прослоек (см. рис. 6) ρ_k , МПа (снизу вверх)	570; 65; 320; 570
Площадь выработки S , м ²	17,8
Номинальная мощность двигателя исполнительного органа, кВт	132
Смещение ПК относительно продольной оси, м	0

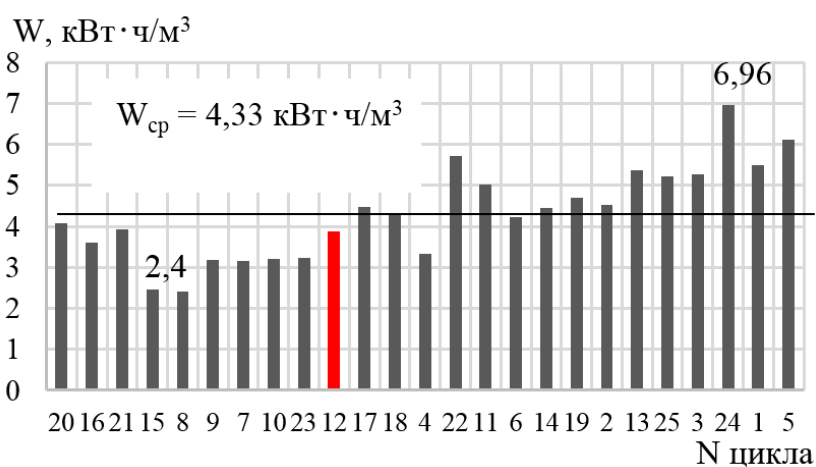


(а)

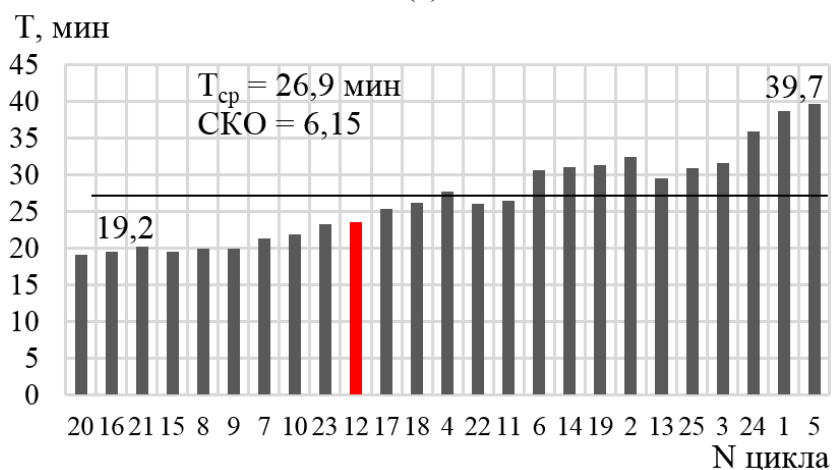
Рис. 7. Показатели эффективности разрушения забоя проходческим комбайном при шахтном эксперименте: мощность (а); производительность (б); удельные энергозатраты (в); время цикла разрушения (г)



(б)



(в)



(г)

Рис. 7. Продолжение

Моделирование производилось путем просчета послойного разрушения забоя горизонтальными резами в соответствии с методикой, описанной в [2] для нулевого смещения. В табл. 2 приведены показатели эффективности работы проходческого комбайна, полученные в результате модельного эксперимента для указанных выше условий, и соответствующие средние показатели по циклам 16, 20 и 21 (максимальная

производительность), полученные в результате обработки данных шахтного эксперимента и соответствующие нулевому смещению комбайна относительно продольной оси выработки.

Таблица 2. Сравнение показателей эффективности работы проходческого комбайна при шахтном и модельном экспериментах

Показатель	Данные шахтного эксперимента	Данные модельного эксперимента	Отклонение результатов, %
P , кВт	68,8	79,0	14,8
Q , м ³ /мин	0,297	0,314	5,7
W , кВт·ч/м ³	3,9	4,2	7,7
$T_{ц}$, мин	19,6	20,9	6,6

Расхождение результатов моделирования и экспериментальных данных не превышает $\pm 15\%$, что подтверждает адекватность разработанной математической модели формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке. Таким образом, разработанная математическая модель может быть использована для выполнения теоретических исследований по установлению закономерностей рабочего процесса разрушения забоя исполнительным органом с осевой коронкой и определению влияния горно-геологических, горнотехнических факторов, конструктивных и режимных параметров проходческого комбайна на показатели эффективности его работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана комплексная математическая модель формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке, учитывающая влияние горно-геологических условий, геометрических параметров исполнительного органа и схемы набора режущего инструмента, а также режимных параметров работы комбайна на процесс разрушения горного массива. Схема состоит из математических моделей разрушаемого массива и поверхности забоя, математической модели определения координат резца в системе координат выработки, математической модели для определения параметров процесса разрушения массива резцами коронки (усилий резания и подачи на резце), учитывающей условие наличия контакта резца с забоем.

2. Установлена адекватность разработанной математической модели формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке проходческого комбайна. При модельном и шахтном экспериментах максимальное расхождение результатов сравнения интегральных показателей эффективности разрушения забоя проходческим комбайном не превысило $\pm 15\%$. Разработанная математическая модель может быть использована для выполнения теоретических исследований по установлению закономерностей рабочего процесса разрушения забоя исполнительным органом с осевой коронкой и с учетом влияния горно-геологических, горнотехнических факторов, конструктивных и режимных параметров проходческого комбайна на показатели эффективности его работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шабает О.Е., Довгань А.Ю. Экспериментальные исследования нагрузочных характеристик двигателя привода исполнительного органа проходческого комбайна КСП-35 в представительных условиях его эксплуатации // *Вестник ДонНТУ*. 2018. № 4. С. 34–40.

2. Шабаев О.Е., Довгань А.Ю. Влияние позиционирования проходческого комбайна КСП-35 в проходческом забое на эффективность его функционирования // *Вестник ДонНТУ*. 2020. № 3 (21). С. 35–42.
3. Семенченко А.К., Шабаев О.Е., Семенченко Д.А., Хиценко Н.В. Математическая модель вектора внешнего возмущения на аксиальной коронке проходческого комбайна // *Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-електромеханічна*. 2006. Вип. 104. С. 198–205.
4. Шабаев О.Е., Бريدун И.И., Хиценко Н.В. Техническая диагностика резцового исполнительного органа проходческого комбайна / под общ. ред. О.Е. Шабаева. Донецк: ООО «Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ»», 2015. 200 с.
5. Кондрахин В.П., Хиценко А.И. Идентификация усилия резания горных пород // *Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-електромеханічна*. 2001. Вип. 35. С. 38–47.
6. Семенченко Д.А. Влияние кинематических изменений заднего и переднего углов поворотного резца на формирование усилия подачи // *Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-електромеханічна*. 2001. Вип. 27. С. 340–344.
7. Кондрахин В.П. Имитационная модель процесса разрушения породы рабочими органами породоразрушающих машин: сборник научных трудов Национальной горной академии Украины. Днепропетровск: НГАУ, 1998. Т. 6. № 3. С. 33–38.
8. Горбатов П.А., Кондрахин В.П. Закономерности формирования толщины стружки, снимаемой резцом горного комбайна // *Известия вузов. Горный журнал*. 1991. № 10. С. 75–78.
9. Бойко Н.Г. Рациональная ширина среза и схема набора режущего инструмента исполнительных органов комбайнов для тонких пластов // *Известия вузов. Горный журнал*. 1983. № 2. С. 76–79.
10. Кондрахин В.П., Гуляев В.Г., Горбатов П.А. О влиянии пространственных колебаний исполнительных органов комбайнов на измельчение угля // *Уголь Украины*. 1996. № 4. С. 37–39.
11. Гуляев В.Г., Семенченко Д.А. Определение удельных энергозатрат и вектора внешнего возмущения корончатого исполнительного органа проходческого комбайна в различных режимах обработки забоя // *Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-електромеханічна*. 2001. Вип. 35. С. 38–47.
12. Семенченко Д.А. Влияние формы аксиальной коронки на формирование толщины стружки на резцах и энергозатраты разрушения при боковом резе. *Перспективы развития угольной промышленности в XXI веке: Сборник научных трудов, посвященный 45-летию ДГМИ*. Алчевск: ДГМИ, 2002. С. 268–273.
13. Кондрахин В.П., Хиценко А.И. Имитационное моделирование усилий резания и подачи при резании горных пород // *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2010. № 2. С. 150–154.
14. Красникова О.Ю., Гусева И.М. К вопросу повышения динамической устойчивости проходческого комбайна со стреловидным исполнительным органом. *Процессы и средства разрушения угля и горных пород: науч. сообщения*. М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1987. С. 77–81.
15. Хургин З.Я., Крыловский А.Л. Имитационная модель формирования нагруженности проходческого комбайна избирательного действия // *Научно-технические вопросы комплексной механизации горнопроходческих работ*. 1981. Вып. 202. С. 60–65.
16. Горбатов П.А., Кондрахин В.П. Закономерности формирования внешней нагрузки на исполнительном органе и динамические характеристики горного комбайна // *Известия вузов. Горный журнал*. 1991. № 3. С. 81–95.

Для цитирования: Шабает О.Е., Довгань А.Ю. Математическая модель формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке исполнительного органа проходческого комбайна // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2024. № 2 (22). С. 55–72.

A MATHEMATICAL MODEL OF THE FORMATION OF AN EXTERNAL DISTURBANCE VECTOR ON THE AXIAL CROWN OF A BOOM-TYPE HEADING MACHINE

O.E. SHABAEV¹, Dr. Sc, A.Yu. DOVGAN^{1,2}, postgraduate

¹Donetsk National Technical University,

58, st. Artema, 283001, Donetsk, e-mail: donntu.info@mail.ru

²Mine Automation Research Institute named after V.A. Antipov,
93, Plycha ave., 283003, Donetsk, e-mail: avtomatgormash@mail.ru

A complex model of the formation of an external disturbance vector on the axial crown of the executive body has been developed, taking into account the influence of mining and geological conditions and operating parameters of the combine on the process of destruction of the mountain range, which consists of models of the destroyed array and the face surface, finding the coordinates of the tip of the cutter in the face, evaluating the conditions of contact of the cutter with the array, determining the parameters of the process of destruction of the array by cutters crowns for determining the cutting and feeding forces on the cutter, taking into account the fulfillment of the contact condition of the cutter with the face. The adequacy of the mathematical model was assessed by comparing the indicators obtained during model and experimental studies: average fracture power per cycle, theoretical productivity, specific energy consumption per cycle, and the duration of face treatment.

Keywords: mathematical model, heading machine, cutter, boom, external disturbance vector.

Поступила в редакцию/received: 26.02.2024; после рецензирования/revised: 28.02.2024;
принята/accepted: 01.03.2024

УДК 622.331:622.271

ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ

Е.Ю. ЧЕРТКОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: lastochka-w@mail.ru

© Черткова Е.Ю., 2024

Рассмотрены вопросы управления качеством торфяного сырья. Разработана технология добычи фрезерного торфа с интенсификацией сушки в полевых условиях до уборочной влажности менее 40 % за счет переменной высоты общего слоя, что