

УДК 531.8:62-231.1

А. В. ЛОКТИОНОВ

*Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь***РАСЧЁТ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖУЩИХ ГОЛОВОК
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ
С УЧЁТОМ УГЛОВ ПОВОРОТА РЕЗЦЕДЕРЖАТЕЛЯ И РЕЗЦА**

Предложен алгоритм определения кинематических характеристик пространственных исполнительных механизмов с учётом углов поворота резцедержателя и резца. Получены выражения в матричной форме, которые могут быть использованы при расчётах стреловидных исполнительных органов проходческих и угледобывающих комбайнов.

Ключевые слова: кинематический расчёт, исполнительный механизм, стрела, режущая головка, матричный метод, угол поворота, резцедержатель, резец.

В большинстве отечественных и зарубежных конструкций режущих головок [1], например в проходческих комбайнах ПК-3Р, ГПКС, угол поворота резцедержателя с резцом равен нулю. В комбайнах ГПК-2 угол поворота резцедержателя не равен нулю. При установке на режущих головках радиальных резцов типа РО-65, ЗР-4.80 и тангенциальных резцов типа ИТ-125С следует анализировать угол поворота резца относительно продольной его оси. При установке резцов с круглым стержнем типа РКС-1, РКС-2, РКС-3 практический интерес представляют расчётные формулы только для угла поворота резцедержателя с резцом, не равного нулю.

Существующие методы определения кинематических характеристик исполнительных органов разработаны в основном на базе аналитической геометрии и применимы для одной конструкции органа [2–4]. Использование матричного исчисления в общем случае приводит к существенному упрощению кинематического анализа пространственных исполнительных механизмов с учётом углов поворота резцедержателя и резца. В работах [5–7] рассмотрен расчёт матричным методом кинематических параметров стреловидного исполнительного органа в общем случае его движения с учётом угла установки резцов и тангенциального их размещения на режущей головке исполнительного механизма. При расчёте кинематических параметров стреловидных исполнительных органов [8–11] в общем случае их движения следует учитывать угол ϵ_1 поворота (разворота) резцедержателя с резцом и угол ϵ_2 поворота резца относительно продольной оси его симметрии.

Определим проекции вектора абсолютной скорости точки M (резца) на оси $X_8Y_8Z_8$, которые совпадают с осями симметрии резца. Исходные расчётные параметры исполнительных органов с продольно-осевой и поперечно-осевой режущими головками показаны на рисунках 1 и 2. Учитываются угол

установки резцов β_1 , тангенциальное их размещение на корпусе головки исполнительного органа (угол β_1), углы ε_1 , ε_2 и угол λ наклона оси закрепления головки или диска с резцами относительно продольной оси O_1X_1 (рисунок 2).

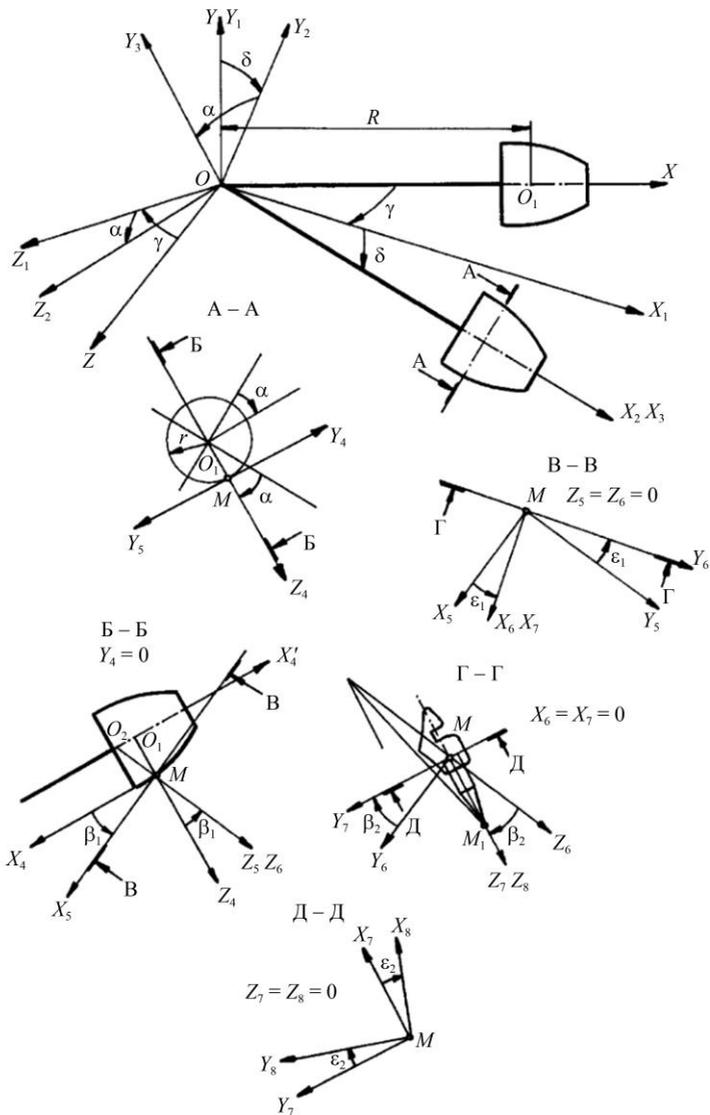


Рисунок 1 – Расчётная схема для определения кинематических параметров корончатого исполнительного органа с продольно-осевой режущей головкой в общем случае его движения с учётом углов поворота резцедержателя и резца

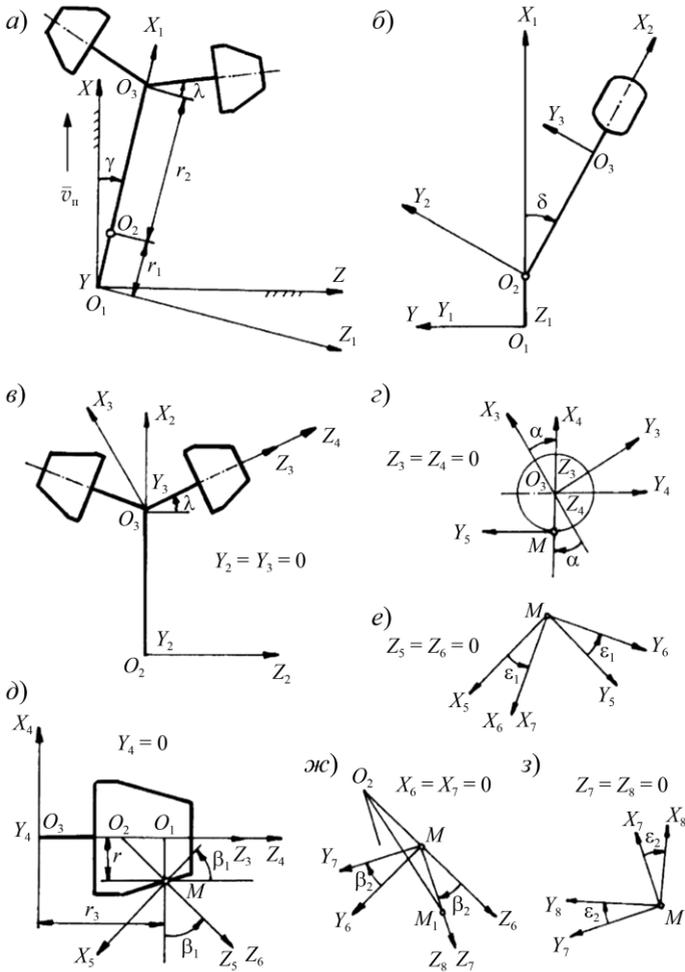


Рисунок 2 – Расчётная схема для определения кинематических параметров режущих головок исполнительных органов в общем случае их движения с учётом углов поворота резцедержателя и реза

Координаты точки M исполнительного органа с продольно-осевой режущей головкой (рисунок 1) в неподвижной системе XYZ выражаются через координаты этой точки в системе $X_8Y_8Z_8$ следующим образом:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = A_\gamma A_\delta A_\alpha \begin{pmatrix} R \\ 0 \\ r \end{pmatrix} + A_\gamma A_\delta A_\alpha A_{\beta_1} A_{\varepsilon_1} A_{\beta_2} A_{\varepsilon_2} \begin{pmatrix} X_8 \\ Y_8 \\ Z_8 \end{pmatrix},$$

где $A_\gamma, A_\delta, A_\alpha, A_{\beta_1}, A_{\varepsilon_1}, A_{\beta_2}, A_{\varepsilon_2}$ – матрицы преобразования координат при повороте осей на соответствующий угол.

Вектор скорости точки M в системе $X_8Y_8Z_8$ с учётом прямолинейного поступательного перемещения органа вдоль оси OX со скоростью \bar{v}_n для продольно-осевой режущей головки находится по формуле

$$\bar{v}_8 = A' \left[\begin{pmatrix} \frac{dA_\gamma}{d\gamma} A_\delta A_\alpha \dot{\gamma} + A_\gamma \frac{dA_\delta}{d\delta} A_\alpha \dot{\delta} + A_\gamma A_\delta \frac{dA_\alpha}{d\alpha} \dot{\alpha} \\ 0 \\ r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ 0 \\ r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{dA_\gamma}{d\gamma} A_\delta A_\alpha A_{\beta_1} A_{\varepsilon_1} A_{\beta_2} A_{\varepsilon_2} \dot{\gamma} + \\ + A_\gamma \frac{dA_\delta}{d\delta} A_\alpha A_{\beta_1} A_{\varepsilon_1} A_{\beta_2} A_{\varepsilon_2} \dot{\delta} + A_\gamma A_\delta \frac{dA_\alpha}{d\alpha} A_{\beta_1} A_{\varepsilon_1} A_{\beta_2} A_{\varepsilon_2} \dot{\alpha} \\ \begin{pmatrix} X_8 \\ Y_8 \\ Z_8 \end{pmatrix} \end{pmatrix} \right] + A' \begin{pmatrix} V_n \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $A' = A'_\gamma A'_\delta A'_\alpha A'_{\beta_1} A'_{\varepsilon_1} A'_{\beta_2} A'_{\varepsilon_2}$ – транспонированная матрица; $X_8Y_8Z_8$ – текущие координаты реза.

Из уравнения (1) можно найти проекции $\dot{X}_8, \dot{Y}_8, \dot{Z}_8$ вектора \bar{v}_8 абсолютной скорости точки M на оси X_8, Y_8, Z_8 . Они позволяют определить кинематические углы реза (точка M) продольно-осевых режущих головок в процессе резания для общего случая движения исполнительного органа при $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \neq 0^\circ$.

При поперечной подаче исполнительного органа формулы для расчёта углов φ и τ при $\alpha = \delta = \varepsilon_2 = 0^\circ$ имеют вид:

$$\varphi = \arctg \frac{r\omega_2 \sin \varepsilon_2 + (R \sin \beta_1 + r \cos \beta_1)\omega_1 \cos \varepsilon_1}{r\omega_2 \cos \beta_2 \cos \varepsilon_1 - (R \sin \beta_1 + r \cos \beta_1)\omega_1 \cos \beta_2 \sin \varepsilon_1 - (R \cos \beta_1 - r \sin \beta_1)\omega_1 \sin \beta_2};$$

$$\tau = \arctg \frac{r\omega_2 \sin \beta_2 \cos \varepsilon_1 - (R \sin \beta_1 + r \cos \beta_1)\omega_1 \sin \beta_2 \sin \varepsilon_1 + (R \cos \beta_1 - r \sin \beta_1)\omega_1 \cos \beta_2}{r\omega_2 \cos \beta_2 \cos \varepsilon_1 - (R \sin \beta_1 + r \cos \beta_1)\omega_1 \cos \beta_2 \sin \varepsilon_1 - (R \cos \beta_1 - r \sin \beta_1)\omega_1 \sin \beta_2}.$$

В случае продольной подачи исполнительного органа углы φ и τ при $\alpha = \delta = \gamma = \varepsilon_2 = 0^\circ$ таковы:

$$\varphi = \arctg \frac{v_n \cos \beta_1 \cos \varepsilon_1}{r\omega_2 \cos \beta_2 \cos \varepsilon_1 + v_n (\cos \beta_2 \cos \beta_1 \sin \varepsilon_1 - \sin \beta_2 \sin \beta_1)};$$

$$\tau = \arctg \frac{r\omega_2 \sin \beta_2 \cos \varepsilon_1 + v_n (\sin \beta_2 \cos \beta_1 \sin \varepsilon_1 + \cos \beta_2 \sin \beta_2)}{r\omega_2 \cos \beta_2 \cos \varepsilon_1 + v_n (\cos \beta_2 \cos \beta_1 \sin \varepsilon_1 - \sin \beta_2 \sin \beta_1)}.$$

Координаты точки M исполнительного органа с поперечно-осевой режущей головкой (рисунок 2) в неподвижной системе XYZ выражаются через координаты этой точки в системе $X_8Y_8Z_8$ следующим образом:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = A_\gamma \begin{pmatrix} r_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + A_\gamma A_\delta \begin{pmatrix} r_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + A_\gamma A_\delta A_\lambda A_\alpha \begin{pmatrix} -r \\ 0 \\ r_3 \end{pmatrix} + A_\gamma A_\delta A_\lambda A_\alpha A_{\beta_1} A_{\varepsilon_1} A_{\beta_2} A_{\varepsilon_2} \begin{pmatrix} X_8 \\ Y_8 \\ Z_8 \end{pmatrix}.$$

Вектор скорости точки M в системе $X_8 Y_8 Z_8$ с учётом прямолинейного поступательного перемещения органа вдоль оси $O_1 X$ со скоростью \bar{v}_Π для поперечно-осевой режущей головки находится по формуле

$$\begin{aligned} \bar{v}_8 = A' \left\{ \dot{\gamma} \left[\frac{dA_\gamma}{d\gamma} \begin{pmatrix} r_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{dA_\gamma}{d\gamma} A_\delta \begin{pmatrix} r_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{dA_\gamma}{d\gamma} A_\delta A_\lambda A_\alpha \begin{pmatrix} -r \\ 0 \\ r_1 \end{pmatrix} + \left(\frac{dA_\gamma}{d\gamma} A_\delta A_\lambda A_\alpha A_{\beta_1} A_{\varepsilon_1} A_{\beta_2} A_{\varepsilon_2} \right) \begin{pmatrix} X_8 \\ Y_8 \\ Z_8 \end{pmatrix} \right] + \right. \\ \left. + \dot{\delta} \left[A_\gamma \frac{dA_\delta}{d\delta} \begin{pmatrix} r_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + A_\gamma \frac{dA_\delta}{d\delta} A_\lambda A_\alpha \begin{pmatrix} -r \\ 0 \\ r_3 \end{pmatrix} + A_\gamma \frac{dA_\delta}{d\delta} A_\lambda A_\alpha A_{\beta_1} A_{\varepsilon_1} A_{\beta_2} A_{\varepsilon_2} \begin{pmatrix} X_8 \\ Y_8 \\ Z_8 \end{pmatrix} \right] + \right. \\ \left. + \dot{\alpha} \left[A_\gamma A_\delta A_\lambda \frac{dA_\alpha}{d\alpha} \begin{pmatrix} -r \\ 0 \\ r_3 \end{pmatrix} + A_\gamma A_\delta A_\lambda \frac{dA_\alpha}{d\alpha} A_{\beta_1} A_{\varepsilon_1} A_{\beta_2} A_{\varepsilon_2} \begin{pmatrix} X_8 \\ Y_8 \\ Z_8 \end{pmatrix} \right] + \begin{pmatrix} V_\Pi \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\}, \quad (2) \end{aligned}$$

где $A' = A'_{\varepsilon_2} A'_{\beta_2} A'_{\varepsilon_1} A'_{\beta_1} A'_\alpha A'_\lambda A'_\delta A'_\gamma$ – транспонированная матрица; $\dot{\gamma} = \omega_1$, $\dot{\alpha} = \omega_2$, $\dot{\delta} = \omega_3$; X_8, Y_8, Z_8 – текущие координаты реза.

Определяемые из уравнения (2) проекции вектора \bar{v}_8 абсолютной скорости точки M на оси X_8, Y_8, Z_8 позволяют найти кинематические углы реза (точка M) в процессе резания поперечно-осевых режущих головок в общем случае движения исполнительного органа при $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \neq 0^\circ$ [5–7]. При необходимости исследование можно провести и при $X_8 = Y_8 = Z_8 \neq 0$.

Таким образом, в работе представлен матричный метод расчёта кинематических параметров продольных и поперечных режущих головок стреловидных исполнительных органов проходческих комбайнов, в общем случае их движения. Учитываются тангенциальное и радиальное размещение резцов, углы поворотов резцедержателя с резцом и реза относительно продольной оси его симметрии. Предложены аналитические расчётные формулы, позволяющие оценить установку резцов на режущих головках исполнительных механизмов, а следовательно, и эффективность их работы по разрушению массива. Полученные соотношения справедливы при различном конструктивном выполнении органов в виде, например, конуса, сферы, цилиндра, овального корпуса, дисков.

Расчёт кинематических углов должен быть составной частью конструирования стреловидных исполнительных органов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Проходческие комбайны со стреловидным исполнительным органом Ч. 3: Выбор и обоснование рабочих параметров двухкорончатых реверсивных исполнительных органов / А. А. Хорешок [и др.]. – Томск : Изд-во Томского политехнического ун-та, 2016. – 135 с.

2 **Степаненко, Е. Ю.** Структура и математическая модель мехатронной системы подачи стреловидного исполнительного органа проходческого комбайна / Е. Ю. Степаненко, О. Е. Шабаетов, Д. А. Семенченко // Вестник Криворожского национального университета. – 2012. – Т. 1, № 31–1. – С. 236–241.

3 **Cheluska, P.** Optimization of the cutting process parameters to ensure high efficiency of drilling tunnels and use the technical potential of the boom-type roadheader / P. Cheluska // *Energies*. – 2020. – Vol. 13, no. 24. – Paper 6597. – 23 p.

4 **Fowell, R. J.** The mechanics of rock cutting / R. J. Fowell // *Comprehensive rock engineering*. – 2016. – Vol. 4. – P. 155–176.

5 **Локтионов, А. В.** Кинематический анализ режущего инструмента исполнительных органов горных машин / А. В. Локтионов // *Изв. вузов. Горный журнал*. – 1979. – № 3. – С. 79–83.

6 **Локтионов, А. В.** Расчёт кинематических параметров режущего инструмента исполнительных органов проходческих комбайнов с продольной режущей головкой / А. В. Локтионов // *Изв. вузов. Горный журнал*. – 1990. – № 3. – С. 68–76.

7 **Локтионов, А. В.** Матричная методика расчёта кинематических параметров исполнительного механизма в общем случае его движения / А. В. Локтионов // *Механика. Исследования и инновации*. – 2018. – Вып. 11. – С. 176–184.

8 **Eyyuboglu, E. M.** Effects of circumferential pick spacing on boom type roadheader cutting head performance / E. M. Eyyuboglu, N. Bolukbasi // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2005. – Vol. 20, no. 5. – P. 418–425.

9 Об учете неоптимальных режимов резания горных пород тангенциальными резцами / А. Б. Жабин [и др.] // *Уголь*. – 2019. – № 7 (1120). – С. 20–24.

10 New computer simulation procedure of heading face mining process with transverse cutting heads for roadheader automation / M. Dolipksi [et al.] // *Archives of Mining Sciences*. – 2017. – Vol. 62, no. 1. – P. 83–104.

11 **Tian, J.** Kinematic models and simulations for trajectory planning in the cutting of spatially-arbitrary cross sections by a robotic roadheader / J. Tian, S. Wang, M. Wu // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2018. – Vol. 78. – P. 115–123.

A. V. LOKTIONOV

Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Belarus

CALCULATION OF KINEMATIC PARAMETERS OF SPATIAL ACTUATORS CUTTING HEADS CONSIDERING THE TOOLHOLDER AND CUTTER ROTATION ANGLES

There is proposed an algorithm for determining the kinematic characteristics of spatial actuators, taking into account the rotation angles of the tool holder and the cutter. The expressions are obtained in matrix form, which can be used for the swept-type executive bodies of tunneling and coal mining combines calculation.

Получено 07.08.2020