

## Научная статья

УДК 622.23.05

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-6-32-40

Нозирзода Шодмон Салохидин, Никитин Евгений Иванович

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

\*e-mail: shoni\_1997@mail.ru

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫПУКЛОЙ ГЕЛИКОИДНОЙ ФОРМЫ НОЖА ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ГЕОХОДА****Информация о статье**

Поступила:

25 ноября 2023 г.

Одобрена после

рецензирования:

30 ноября 2023 г.

Принята к печати:

01 декабря 2023 г.

Опубликована:

21 декабря 2023 г.

**Ключевые слова:**

геоход, ножевой исполнительный орган, режущая кромка, выпуклая форма, координаты, геометрические параметры

**Аннотация.**

для реализации технологических решений по изготовлению ножа выпуклой геликоидной формы исполнительного органа в виде лобового рабочего инструмента проходческого подземного агрегата – геохода – необходимо выявить взаимосвязь между параметрами поперечного сечения ножа с конструктивными решениями ножевого исполнительного органа. Для моделирования процесса формообразования режущей кромки для выпуклой геликоидной формы ножа проанализированы основные конструктивные параметры и параметры сечения ножа исполнительного органа исходя из оптимальной геометрии режущей кромки. В работе рассматриваются изменения координат точек режущей кромки ножа исполнительного органа геохода для разрушения мягкой породы, которые меняются по длине дуги окружности радиуса  $R$  в зависимости от угла расположения сечения –  $\varphi$ , с одновременным его поворотом на угол  $\beta$  вокруг оси перпендикулярной к поперечному сечению ножа. В качестве метода исследования применяются матричный метод преобразований координат, в котором исследуемые данные представляются в виде матрицы, где каждый элемент матрицы соответствует определенному параметру или характеристике. По заданным параметрам поперечного сечения ножа выпуклой формы получена система уравнений, которая позволяет в зависимости от оптимальных геометрических характеристик режущей кромки ножа получить траекторию точек режущей кромки. Разработана специальная программа в среде MATLAB для решения системы уравнений, по результатам которой получен график траекторий точек режущей кромки для выпуклой геликоидной формы ножа исполнительного органа геохода.

**Для цитирования:** Нозирзода Ш.С., Никитин Е.И. Разработка математической модели формирования выпуклой геликоидной формы ножа исполнительного органа геохода // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 6 (170). С. 32-40. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-6-32-40, EDN: WHIFMN

**Актуальность работы.** Для формирования подземного пространства предложен новый вид горной машины – геохода, в основе которой лежит геоходная технология прокладки подземных сооружений [1-6]. Геоход – подземный агрегат, предназначенный для передвижения по неровной местности или в условиях сильного перепада высот.

В конструкции геохода для разрушения мягких пород предложен ножевой исполнительный орган в качестве рабочего органа. Для разрушения мягкой породы предлагаются различные формы ножа исполнительного органа геохода, которые имеют ряд преимуществ и недостатков. Данные формы ножа

исполнительного органа учитывают ряд специфических условий работы проходческого подземного агрегата – геохода. Одним из альтернативных вариантов конструкции для разрушения горной массы, который предлагается в работах [7-12], является выпуклая геликоидная форма ножа исполнительного органа проходческого агрегата. Также в работах [12-16] показано, что данная форма ножа исполнительного органа имеет минимальные напряжения при максимальных нагрузках.

Исходя из вышесказанного, можно отметить, что для разработки технологических решений и реализации технологии изготовления ножа выпук-

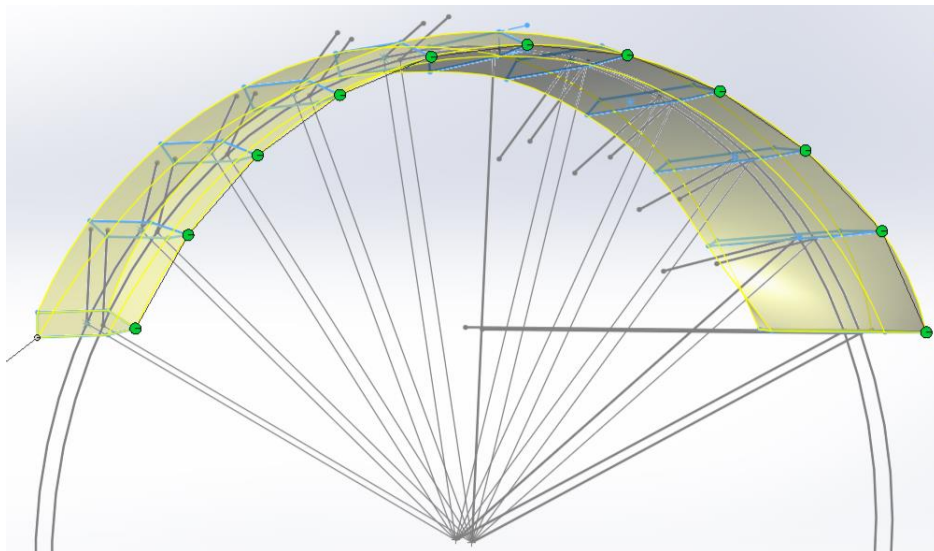


Рис. 1. Формирование выпуклой геликоидной формы ножа исполнительного органа геохода  
Fig. 1. Formation of the helicoid shape of the bladed working body geokhod

лой формы исполнительного органа геохода требуется разработка математических моделей геликоидной формы ножа со сложной геометрией. Моделирование формирования выпуклой геликоидной формы ножа облегчает процесс производства основных элементов ножевого исполнительного органа геохода.

**Цель работы:** моделирование выпуклой геликоидной формы режущей кромки ножа исполни-

тельного органа геохода, исходя из конструктивных особенностей исполнительного органа и параметров сечения ножа.

**Методы исследования.** Для моделирования режущей кромки выпуклой геликоидной формы ножа исполнительного органа геохода учитывается, что сечение ножа при перемещении на определенный шаг по дуге ножа поворачивается на угол  $\beta$ , зависящий от его расстояния до оси вращения геохода. Перемещение по дуге ножа задается параметром  $\varphi$  (Рис. 1). Методика построения 3D-модели ножей различной формы изложена в работах [13-14]. Нами предлагается новая аналитическая методика, основанная на использовании метода преобразования координат с помощью матриц.

Рассмотрим положение ножа, которое приведено на Рис. 2, на нем указаны три декартовы прямоугольные системы координат. Декартова система координат  $X_0Y_0Z_0$  является неподвижной и жестко связана с исходным положением сечения ножа. Декартова система координат  $X_1Y_1Z_1$  является подвижной и связана с положением сечения ножа, характеризуемого углом  $\varphi$ . Система координат  $X_2Y_2Z_2$  жестко связана с текущим положением сечения ножа, повернутого под углом  $\beta$  вокруг оси  $Z_1$ .

Оси  $Z$  в системах координат направлены по касательным к дуге изгиба ножа по радиусу  $R$ . Оси  $X_0$  и  $X_1$  остаются параллельными при перемещении сечения вдоль дуги ножа и перпендикулярны плоскости, в которой лежит дуга ножа. Оси  $Z_1, Z_2$  всегда совпадают и направлены перпендикулярно к сечению ножа. Оси системы  $X_2, Y_2$ , жестко связанные с сечением ножа, поворачиваются вместе с ним на угол  $\beta$  вокруг оси  $Z_1$  в зависимости от угла  $\varphi$ .

Для определения уравнений движения характерных точек ножа используем матричный метод преобразований координат [18-20]. Для преобразований используем матрицу размером  $4 \times 4$ , кото-

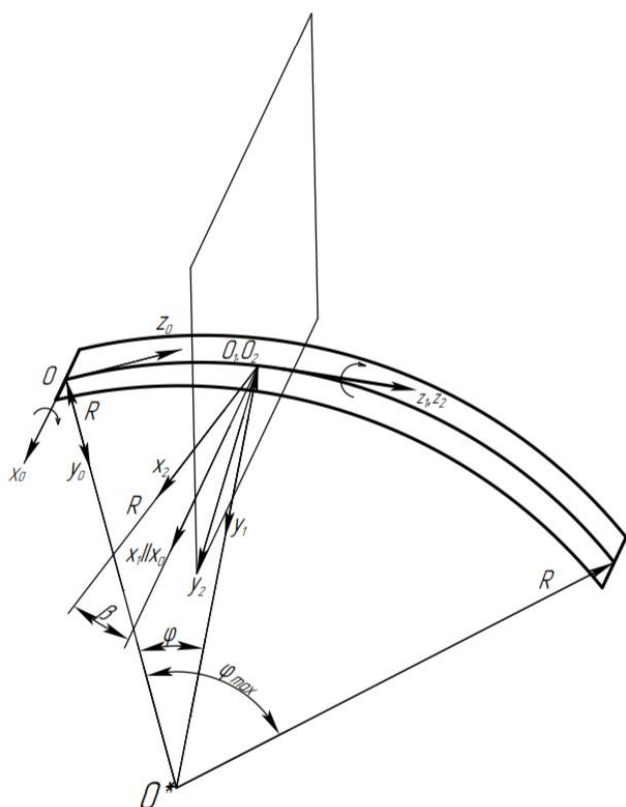


Рис. 2. Неподвижная и подвижные системы координат в сечении ножа для выпуклой формы  
Fig. 2. Systems of movable and fixed coordinates in the bladed section

рая позволяет учитывать отмеченный ранее характер движения сечения по отношению к неподвижной системе координат. Матрица преобразований координат от подвижной системы (с индексом 2) к подвижной (с индексом 1) имеет вид:

$$M_{12} = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Матрица преобразований координат от подвижной системы (с индексом 1) к неподвижной (с индексом 0) имеет вид:

$$M_{01} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi & 2R \sin^2 \frac{\varphi}{2} \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi & R \sin \varphi \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Вектор, составленный из координат каждой точки в системах  $X_2, Y_2, Z_2$  и  $X_0, Y_0, Z_0$ , имеет вид соответственно:

$$\vec{r}_2^{(i)} = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Преобразование координат точки можно записать в виде:

$$\vec{r}_0^{(i)} = M_{01} \cdot M_{12} \cdot \vec{r}_2^{(i)} \quad (4)$$

Преобразование координат точки имеет вид:

$$\vec{r}_0^{(i)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi & 2R \sin^2 \frac{\varphi}{2} \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi & R \sin \varphi \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\vec{r}_0^{(i)} = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 & 0 \\ -\cos \varphi \cdot \sin \beta & \cos \varphi \cdot \cos \beta & \sin \varphi & 2R \cdot \sin^2 \frac{\varphi}{2} \\ \sin \beta \cdot \sin \varphi & -\sin \varphi \cdot \cos \beta & \cos \varphi & R \cdot \sin \varphi \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Следовательно, уравнение координат точек имеет вид:

$$\begin{cases} x_0 = x_2 \cdot \cos \beta + y_2 \cdot \sin \beta \\ y_0 = -x_2 \cdot \cos \varphi \cdot \sin \beta + y_2 \cdot \cos \varphi \cdot \cos \beta + 2R \sin^2 \frac{\varphi}{2} \\ z_0 = x_2 \cdot \sin \beta \cdot \sin \varphi - y_2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \beta + R \cdot \sin \varphi \end{cases} \quad (7)$$

Для определения взаимосвязи между параметрами сечения ножа и параметрами выпуклой геликоидной формы ножа исполнительного органа необходимо рассмотреть схемы, которые приведены на Рис. 3.

Для каждой точки ножа, которая находится от оси вращения геохода на расстоянии  $x$ :

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{h_b}{2 \cdot \pi \cdot x} \quad (8)$$

Рассмотрим два случая. В первом точка находится до середины дуги выпуклой формы. Расстояние  $x$  через параметры выпуклой формы:

$$x = x_1 + x_2 \quad (9)$$

$$\frac{x_1}{R} = \sin \frac{\varphi_{\max}}{2} \quad (10)$$

$$\frac{x_2}{R} = \sin \left( \frac{\varphi_{\max}}{2} - \varphi \right) \quad (11)$$

$$x = x_1 + x_2 = R \cdot \sin \frac{\varphi_{\max}}{2} + R \cdot \sin \left( \frac{\varphi_{\max}}{2} - \varphi \right) = R \cdot \left( \sin \frac{\varphi_{\max}}{2} + \sin \left( \frac{\varphi_{\max}}{2} - \varphi \right) \right) \quad (12)$$

Во втором случае точка находится после середины дуги ножа выпуклой формы. Определяем расстояние  $x$  через параметры выпуклой формы:

$$x = x_1 - x_2 \quad (13)$$

$$\frac{x_1}{R} = \sin \frac{\varphi_{\max}}{2} \quad (14)$$

$$\frac{x_2}{R} = \sin \left( \varphi - \frac{\varphi_{\max}}{2} \right) \quad (15)$$

$$x = x_1 - x_2 = R \cdot \sin \frac{\varphi_{\max}}{2} - R \cdot \sin \left( \varphi - \frac{\varphi_{\max}}{2} \right) = R \cdot \left( \sin \frac{\varphi_{\max}}{2} - \sin \left( \varphi - \frac{\varphi_{\max}}{2} \right) \right) = R \cdot \left( \sin \frac{\varphi_{\max}}{2} + \sin \left( \frac{\varphi_{\max}}{2} - \varphi \right) \right) \quad (16)$$

Исходя из полученных выражений (8) (12) и (16), можно записать следующее:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{h_b}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \left( \sin \frac{\varphi_{\max}}{2} + \sin \left( \frac{\varphi_{\max}}{2} - \varphi \right) \right)}, \text{ или} \quad (17)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{h_b}{4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin \left( \frac{\varphi_{\max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos \frac{\varphi}{2}} \quad (18)$$

При использовании выражений (6) учтем выражения:

$$\cos \beta = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{h_b}{4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin \left( \frac{\varphi_{\max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos \frac{\varphi}{2}} \right)^2}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin \left( \frac{\varphi_{\max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos \frac{\varphi}{2}}{\sqrt{h_b^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2 \left( \frac{\varphi_{\max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2}}} \quad (19)$$

$$\sin \beta = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \beta}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \beta}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin \left( \frac{\varphi_{\max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos \frac{\varphi}{2}}{h_b} \right)^2}} = \frac{h_b}{\sqrt{h_b^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2 \left( \frac{\varphi_{\max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2}}} \quad (20)$$

Подставляя полученные выражения (19), (20) в систему выражений (7) для точек режущей кромки, получаем следующие:

Полученная система выражений (22) координат точек описывает координаты точек сечения ножа, которое поворачивается под углом  $\beta$  вокруг оси  $Z_1$ , при его перемещении по дуге окружности радиусом  $R$  на угол  $\varphi$ . Далее для моделирования режущей кромки рассмотрим поперечное сечение ножа исполнительного органа (Рис. 4).

$$\begin{cases} x_0 = x_2 \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\varphi}{2}}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\frac{\varphi}{2}}} + y_2 \cdot \frac{h_B}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\frac{\varphi}{2}}} \\ y_0 = -x_2 \cdot \cos\varphi \cdot \frac{h_B}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\frac{\varphi}{2}}} + y_2 \cdot \cos\varphi \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\varphi}{2}}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\frac{\varphi}{2}}} + 2R \sin^2\frac{\varphi}{2} \\ z_0 = x_2 \cdot \frac{h_B}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\frac{\varphi}{2}}} \cdot \sin\varphi - y_2 \cdot \sin\varphi \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\varphi}{2}}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\frac{\varphi}{2}}} + R \cdot \sin\varphi \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\frac{\varphi}{2}}} \cdot (x_2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\varphi}{2} + y_2 \cdot h_B) \\ y_0 = \frac{1}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\frac{\varphi}{2}}} \cdot (-x_2 \cdot \cos\varphi \cdot h_B + y_2 \cdot \cos\varphi \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\varphi}{2}) + 2R \sin^2\frac{\varphi}{2} \\ z_0 = \frac{1}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\frac{\varphi}{2}}} \cdot (x_2 \cdot h_B \cdot \sin\varphi - y_2 \cdot \sin\varphi \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\varphi}{2}) + R \cdot \sin\varphi \end{cases} \quad (22)$$

Для формирования режущей кромки ножа выпуклой геликоидной формы исполнительного органа необходимо определить координаты для крайних точек кромки А, В, С, которые являются исходными данными для использования в полученной системе уравнений преобразования координат. Эти данные были определены исходя из оптимальных параметров режущей кромки ножа исполнительного органа [21].

**Результаты.** Используя выражения, которые определяют координаты точек по режущей кромке ножа исполнительного органа, можно определить взаимосвязь между изменениями положения сечения и параметрами выпуклой формы ножа исполнительного органа. Для этого определяем начальные координаты для каждой точки в неподвижной пространственной системе через параметры сечения, исходя из оптимальной геометрии ножа исполнительного органа. Для вершины ножа точка В начальные координаты в неподвижной пространственной системе будут равны:

$$x_2 = \frac{w}{2} \quad (23)$$

$$y_2 = a_1 - \frac{a}{2} \quad (24)$$

Подставляя полученное выражение в систему уравнений, получаем следующее:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\frac{\varphi}{2}}} \cdot \left(\frac{w}{2} \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\varphi}{2} + (a_1 - \frac{a}{2}) \cdot h_B\right) \\ y_0 = \frac{1}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\frac{\varphi}{2}}} \cdot \left(-\frac{w}{2} \cdot \cos\varphi \cdot h_B + (a_1 - \frac{a}{2}) \cdot \cos\varphi \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\varphi}{2}\right) + 2R \sin^2\frac{\varphi}{2} \\ z_0 = \frac{1}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\frac{\varphi}{2}}} \cdot \left(\frac{w}{2} \cdot h_B \cdot \sin\varphi - (a_1 - \frac{a}{2}) \cdot \sin\varphi \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\varphi}{2}\right) + R \cdot \sin\varphi \end{cases} \quad (25)$$

Для точки С начальные координаты

$$x_2 = \frac{w}{2} - c \quad (26)$$

$$y_2 = -\frac{a}{2} \quad (27)$$

Подставляя полученное выражение в систему уравнений, получаем следующее:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\frac{\varphi}{2}}} \cdot \left(\left(\frac{w}{2} - c\right) \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\varphi}{2} - \frac{a}{2} \cdot h_B\right) \\ y_0 = \frac{1}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\frac{\varphi}{2}}} \cdot \left(\left(c - \frac{w}{2}\right) \cdot \cos\varphi \cdot h_B - \frac{a}{2} \cdot \cos\varphi \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\varphi}{2}\right) + 2R \sin^2\frac{\varphi}{2} \\ z_0 = \frac{1}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\frac{\varphi}{2}}} \cdot \left(\left(\frac{w}{2} - c\right) \cdot h_B \cdot \sin\varphi + \frac{a}{2} \cdot \sin\varphi \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\varphi}{2}\right) + R \cdot \sin\varphi \end{cases} \quad (28)$$

Для точки А начальные координаты

$$x_2 = \frac{w}{2} - c \quad (29)$$

$$y_2 = \frac{a}{2} \quad (30)$$

Подставляя полученное выражение в систему уравнений, получаем следующее:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\frac{\varphi}{2}}} \cdot \left(\left(\frac{w}{2} - c\right) \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\varphi}{2} + \frac{a}{2} \cdot h_B\right) \\ y_0 = \frac{1}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\frac{\varphi}{2}}} \cdot \left(\left(c - \frac{w}{2}\right) \cdot \cos\varphi \cdot h_B + \frac{a}{2} \cdot \cos\varphi \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\varphi}{2}\right) + 2R \sin^2\frac{\varphi}{2} \\ z_0 = \frac{1}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\frac{\varphi}{2}}} \cdot \left(\left(\frac{w}{2} - c\right) \cdot h_B \cdot \sin\varphi - \frac{a}{2} \cdot \sin\varphi \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{\max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\varphi}{2}\right) + R \cdot \sin\varphi \end{cases} \quad (31)$$

По заданным параметрам поперечного сечения ножа выпуклой геликоидной формы были получены начальные координаты точек для решения системы уравнений, которые приведены в Таблице 1.

По полученным значениям конструктивных параметров и системе уравнений координат точек была разработана специальная программа в среде MATLAB для решения данной системы. В результате решения данной системы получена траектория изменения точки режущей кромки ножа относительно начала неподвижной пространственной системы координат (Рис. 5). В данной системе точка В является вершиной режущей кромки, точки А и С яв-

ляются точками начала режущей кромки. Точка В является вершиной режущей кромки, точки А и С являются точками начала режущей кромки.

Таблица 1. Значение параметров и начальные координаты точек режущей кромки ножа выпуклой геликоидной формы

Table 1. The value of the parameters and the initial coordinates of the points of the cutting edge of the bladed

Конструктивные параметры ножа выпуклой геликоидной формы							Точки в режущей кромки ножа	Координаты	
$w$ , мм	$c$ , мм	$a$ , мм	$aI$ , мм	$\varphi$ , в градусах	$\varphi_{\max}$ , в градусах	$R$ , мм		$x_I$ , мм	$y_I$ , мм
150	42,65	20	15,52	0-128,92	128	400	$B$	75	5,52
							$C$	32,25	10
							$A$	32,35	-10

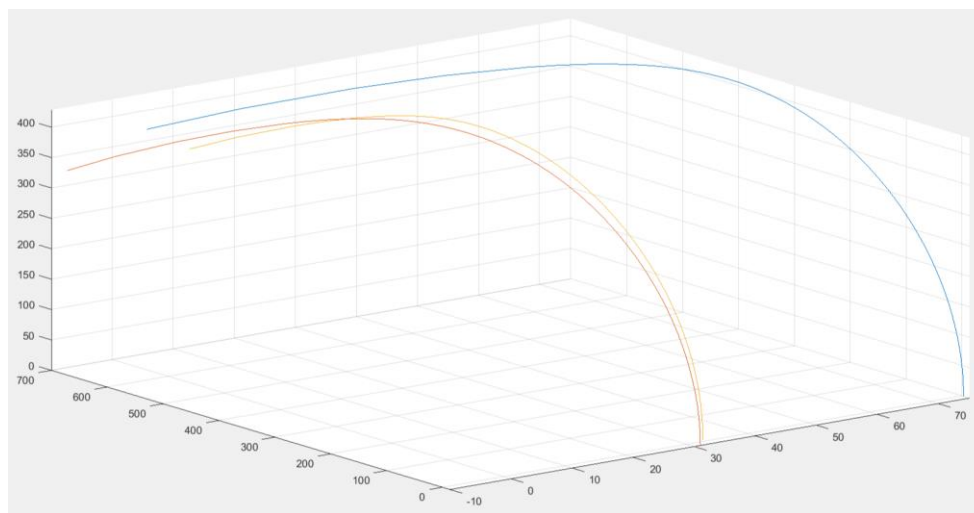


Рис. 5. График траектории изменения координат точек режущих кромок

Fig. 5. Graph of the trajectory of changing the coordinates of the points of the cutting edges

ляются крайними точками, по которым будет затачиваться нож выпуклой геликоидной формы.

В результате проведенного исследования по определению координат точек режущих кромок ножа геликоидной выпуклой формы исполнительного органа геохода была получена система уравнений точек (22), которая задается в неподвижной пространственной декартовой системе координат матричным методом преобразований. Также полученная система уравнений определяет взаимосвязь между конструктивными параметрами и параметрами изменения сечения ножа по радиусу геохода. Полученную систему уравнений можно применить для определения координаты любой точки сечения ножа выпуклой геликоидной формы исполнительного органа геохода. Результаты проведенного исследования можно использовать при изготовлении ножа выпуклой геликоидной формы исполнительного органа для обеспечения высокой точности и качества обработки сложных поверхностей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов В. В., Казанцев А. А., Яровой С. Е., Садовец В. Ю. Конструкция тоннельной обделки винтовой формы для геоходной технологии // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы восемнадцатой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Старый Оскол, 17 декабря 2021 го-

да. Том 1. Старый Оскол : «Национальный исследовательский технологический университет «МИ-СиС», 2021 С. 162–1–66. EDN PYGWYW.

2. Казанцев А. А., Аксенов В. В., Садовец В. Ю. Разработка конструктивного решения высокоточной тоннельной обделки винтовой формы для геоходной технологии // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2021. № 5(147). С. 15–23. DOI 10.26730/1999-4125-2021-5-15-23. EDN GTUUUE.

3. Аксенов В. В., Бегляков В. Ю., Дубинкин Д. М. Обоснование необходимости создания нового научного направления – геодинамика подземных аппаратов // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. Т. 13. №4(50). С. 637–643. DOI 10.21177/1998-4502-2021-13-4-637-643. EDN YVWTRM.

4. Аксенов В. В., Магазов С. В., Хорешок А. А. [и др.] Создание проходческих подземных аппаратов, взаимодействующих с геосредой. Области исследований // Перспективы инновационного развития угольных регионов России : Сборник трудов VII Международной научно-практической конференции, Прокопьевск, 30 апреля 2020 года. Прокопьевск : Филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» в г. Прокопьевске, 2020. С. 110–116. EDN TFWVWX.

5. Аксенов В. В., Чичерин И. В. Общая структура и требования к системе управления геолодом // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. № 6(124). С. 41–47. DOI: 10.26730/1999-4125-2017-6-41-46. EDN YLZWVA.
6. Аксенов В. В., Бегляков В. Ю., Казанцев А. А. [и др.] Опыт участия в проекте по организации высокотехнологичного производства // Горное оборудование и электромеханика. 2016. № 8(126). С. 8–15. EDN WWDBRT.
7. Аксенов В. В., Садовец В. Ю., Пашков Д. А. Обоснование необходимости создания исполнительного органа геолода для разрушения пород малой крепости // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 6(118). С. 8–15. EDN XVKMRL.
8. Садовец В. Ю., Пашков Д. А. Обоснование необходимости создания барового исполнительного органа геолода для разрушения пород крепостью до 1 по шкале профессора Протождяконова // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте: сборник материалов Международной научно-практической конференции, Кемерово, 29–30 ноября 2017 года: Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, 2017. С. 381–385. EDN YMKXNL.
9. Aksenov V., Sadovets V., Pashkov D. The Influence of Parameters on the Generatrix of the Helicoid Form Guide of Geokhod Bar Working Body // E3S Web of Conferences: The Second International Innovative Mining Symposium, Kemerovo, 20–22 ноября 2017 года. Vol. 21. Kemerovo : EDP Sciences, 2017. DOI: 10.1051/e3sconf/20172103008. EDN ZRRZCX.
10. Aksenov V., Sadovets V., Rezanova E., Pashkov D. Impact of the number of blades of the geokhod cutting body on cutting forces // E3S Web of conferences, Kemerovo, Russian Federation, 24–26 апреля 2017 года. Vol. 15. Kemerovo, Russian Federation : EDP Sciences, 2017. P. 03015. DOI: 10.1051/e3sconf/20171503015. EDN YNHUSR.
11. Аксенов В. В., Садовец В. Ю. Синтез технических решений исполнительных органов геолодов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2006. № 6–1(57). С. 64–68. EDN YTNCXD.
12. Аксенов В. В., Садовец В. Ю. Синтез технических решений ножевого исполнительного модуля геолода // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2006. № 6–2(58). С. 33–37. EDN KXGTZB.
13. Козлов И. В., Садовец В. Ю., Садовец Р. В. Разработка методики построения твердотельной модели тела ножевого исполнительного органа геолода // Техника и технология горного дела. 2022. № 2(17). С. 67–86. DOI: 10.26730/2618-7434-2022-2-67-86. – EDN SXRDEM.
14. Садовец Р. В., Резанова Е. В. Методика построения твердотельной модели ножевого исполнительного органа геолода // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте: Сборник материалов III Международной научно-практической конференции, Кемерово, 14–17 октября 2019 года / Редколлегия: Д. М. Дубинкин [и др.]. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2019. С. 148–151. EDN JLDJRC.
15. Пашков Д. А. Обоснование силовых и энергетических параметров исполнительных органов геолода для разрушения мягких пород // Развитие – 2021: Научное электронное издание, Кемерово, 11–13 мая 2021 года. Кемерово: Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, 2021. С. 42–55. DOI: 10.53650/9785902305620\_42. EDN ROJAYX.
16. Пашков Д. А., Садовец В. Ю. Влияние геликоидности исполнительного органа на силовые параметры взаимодействия его с породой забоя // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: Сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции, Прокопьевск, 13–14 апреля 2022 года. Прокопьевск : Филиал ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» в г. Прокопьевске, 2022. С. 58–62. EDN VAOLAB.
17. Родин С. П., Урмаев М. С. Определение параметров преобразования геодезических прямоугольных пространственных координат при произвольных значениях параметров // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 1998. № 4–5. С. 3–14. EDN WHSTOJ.
18. Соловьев Н. В. Методы коррекции пространственных искажений изображений плоских объектов в условиях действия полной аффинной группы преобразований // Информационно-управляющие системы. 2003. № 6(7). С. 7–11. EDN KYRLOX.
19. Живаго Э. Я., Фаренбрух Д. С., Борисова Л. Б. Постановка задачи кинематического анализа механизмов, звенья которых связаны одно-контактными кинематическими парами // Машиностроение. 2006. № 16. С. 71–77. EDN ORQVDD.
20. Юнусов Ф. С., Абдреев М. М. Методика аналитического моделирования процесса формообразования винтовых поверхностей дисковым инструментом // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2004. №4. С. 10–12. EDN HRLXOR.
21. Нозирзод Ш. С. Обеспечение эксплуатационных свойств тела ножа геликоидной формы исполнительного органа геолода // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 3(167). С. 49–58. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-3-49-58. EDN NDWGIW.

© 2023 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Об авторах:

**Нозирзода Шодмон Салохидин**, аспирант, ассистент, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, (173003, Россия, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 41), e-mail: shoni\_1997@mail.ru

**Никитин Евгений Иванович**, к.т.н., доцент, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, (173003, Россия, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 41), e-mail: eugeny.nikitin@novsu.ru

Заявленный вклад авторов:

Нозирзода Шодмон Салохидин - концептуализация исследования, сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, выводы, написание текста.

Никитин Евгений Иванович - постановка научной задачи, научный менеджмент, анализ полученных результатов, выводы, написание текста

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-6-32-40

**Shodmon S. Nozirezoda, Evgeny I. Nikitin**

Yaroslav the Wise Novgorod State University

\*E-mail: shoni\_1997@mail.ru

## DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR THE FORMATION OF A CONVEX HELICOID SHAPE OF THE BLADE WORKING BODY OF THE GEOKHOD



### Article info

Received:

25 November 2023

Accepted for publication:

30 November 2023

Accepted:

01 December 2023

Published:

21 December 2023

**Keywords:** geokhod, bladed working body, cutting edge, coordinates, geometric parameters.

### Abstract.

*In the development of design and technological solutions for the manufacture of a bladed working body tunneling underground geokhod unit, it is important to determine the relationship between the parameters of the cross-section of the bladed with the kinematic parameters of the points of the cutting edges. To simulate the process of forming a bladed working body, the profile of a helicoid-shaped bladed is analyzed. The kinematic changes in the cross-section of the bladed working body of the geokhod for the destruction of a soft rock mass, which changes relative to a stationary spatial system, are considered. To obtain the trajectory of changing the points of the cutting edge, a matrix transformation method was applied. As a result of modeling, systems of equations of the extreme points of the cutting edges with one variable are obtained, the dependence of the angle of rotation  $\beta$  on the coordinates along the  $z$  axis is revealed. According to the given parameters of the bladed cross-section, a system of equations is obtained, which allows, depending on the optimal geometric characteristics of the cutting edge of the bladed, to obtain the trajectory of the change of points. A special program has been developed in the MATLAB environment for solving a system of equations, the results of which are a graph of the trajectory of the points of cutting edges. The results of the research can be useful in the formation of manufacturing technology of the main elements bladed working body of the geokhod for the development of control programs for processing the working surfaces of the bladed, which require high accuracy and quality of processing.*

**For citation:** Nozirezoda S.S., Nikitin E.I. Development of a mathematical model for the formation of a convex helicoid shape of the blade working body of the geokhod. Mining Equipment and Electromechanics, 2023; 6(170):32-40 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2023-6-32-40, EDN: WHIFMN

## REFERENCES

1. Aksenov V.V., Kazantsev A.A., Yarovoy S.E., Sadovets V.Yu. Construction of a tunnel lining of a screw shape for geohod technology. *Modern problems of the mining and metallurgical complex. Science and Production: proceedings of the seventeenth All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation, Stary Oskol, December 17*. Stary Oskol: Staroskolsky Institute of Technology (branch) "National Research Technological University "MISiS"; 2021. Pp. 162–166. EDN PYGWYW.

2. Kazantsev A.A., Aksenov V.V., Sadovets V.Yu. Development of a constructive solution for high-precision thin-walled screw mold for geohod technology. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2021; 5(147):15–23. DOI 10.26730/1999-4125-2021-5-15-23. EDN GTUUUE.

3. Aksenov V.V., Beglyakov V.Yu., Dubinkin D.M. Substantiation of the need to create a new scientific direction - geodynamics of underground apparatuses. *Sustainable development of mountain territories*. 2021; 13; 4(50):637–643. DOI 10.21177/1998-4502-2021-13-4-637-643. EDN YVWTRM.

4. Aksenov V.V., Magazov S.V., Khoreshok A.A. [et al.] Creation of tunneling underground apparatuses interacting with the geo-environment. Areas of research. *Prospects for innovative development of coal regions of Russia : Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference, Prokopyevsk, April 30, 2020*. Prokopyevsk: Branch of the T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University in Prokopyevsk; 2020. Pp. 110–116. EDN TFWVWX.

5. Aksenov V.V., Chicherin I.V. The general structure and requirements for the gas management system. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2017; 6(124):41–47. DOI 10.26730/1999-4125-2017-6-41-46. EDN YLZWVA.

6. Aksenov V.V., Beglyakov V.Yu., Kazantsev A.A. [et al.] Experience of participation in the project on the organization of high-tech production. *Mining equipment and electromechanics*. 2016; 8(126):8–15. EDN WWDBRT.

7. Aksenov V.V., Sadovets V.Yu., Pashkov D.A. Substantiation of the need to create an bladed working body of a geokhod for the destruction of rocks of a small fortress / V. V. Aksenov, V. Yu. Sadovets. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2016; 6(118):8–15. EDN XVKMRL.

8. Sadovets V.Yu., Pashkov D.A. Justification of the need to create a bar working body geokhod body for the destruction of rocks with a fortress up to 1 on the scale of Professor Protodiakonov. *Innovations in information technologies, mechanical engineering and motor transport: collection of materials of the International scientific and practical conference, Kemerovo, November 29-30, 2017*. Kemerovo: T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University; 2017. Pp. 381–385. EDN YMKXNL.

9. Aksenov V., Sadovets V., Pashkov D. The Influence of Parameters on the Generatrix of the Helicoid Form Guide of Geokhod Bar Working Body. *E3S Web of Conferences: The Second International Innovative Mining Symposium, Kemerovo, November 20-22, 2017*.

Kemerovo: EDP Sciences; 2017. DOI: 10.1051/e3sconf/20172103008. – EDN ZRRZCX.

10. Aksenov V., Sadovets V., Rezanova E. Pashkov D. Impact of the number of blades of the geokhod cutting body on cutting forces. *E3S Web of conferences, Kemerovo, Russian Federation, April 24-26, 2017*. Kemerovo, Russian Federation: EDP Sciences; 2017. P. 03015. DOI: 10.1051/e3sconf/20171503015. EDN YNHUSR.

11. Aksenov V.V., Sadovets V.Yu. Synthesis of technical solutions for bladed working body of geohouses. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2006; 6–1(57):64–68. EDN YTNCDX.

12. Aksenov V.V., Sadovets V.Yu. Synthesis of technical solutions for the bladed -type geohod module. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2006; 6–2(58):33–37. – EDN KXGTZB.

13. Kozlov I.V., Sadovets V.Yu., Sadovets R.V. Development of a methodology for constructing a solid-state model of a bladed working body of a geohod. *Technique and technology of mining*. 2022; 2(17):67–86. DOI: 10.26730/2618-7434-2022-2-67-86. EDN SXRDEM.

14. Sadovets R.V., Rezanova E.V. Methodology for constructing a solid-state model of bladed -like measuring organ of a geohod. *Innovations in information technologies, mechanical engineering and motor transport : Collection of materials of the III International Scientific and Practical Conference, Kemerovo, October 14-17, 2019*. Editorial Board: D.M. Dubinkin [et al.]. Kemerovo: T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University; 2019. Pp. 148–151. EDN JLDJRC.

15. Pashkov D.A. Substantiation of the power and energy parameters of the working organs of the geohod for the destruction of soft rocks. *Razvitie – 2021: Scientific electronic edition, Kemerovo, May 11-13, 2021*. Kemerovo: Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2021. Pp. 42–55. DOI: 10.53650/9785902305620\_42. EDN POJAYX.

16. Pashkov D.A., Sadovets V.Yu. The influence of the helicoid of the bladed working body on the power parameters of its interaction with the rock face. *Prospects for innovative development of coal regions of Russia : Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference, Prokopyevsk, April 13-14, 2022*. Prokopyevsk: Branch of the T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University in Prokopyevsk; 2022. Pp. 58–62. EDN VAOLAB.

17. Rodin S.P., Urmaev M.S. Determination of the parameters of the transformation of geodesic rectangular spatial coordinates in arbitrary parameter values. *Izvestia of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*. 1998; 4–5:3–14. EDN WHSTOJ.

18. Solovyov N.V. Methods of correction of spatial distortions of images of flat objects under conditions of action of a complete affine group of transformations. *Information and control systems*. 2003; 6(7):7–11. EDN KYRLOX.

19. Zhivago E.Ya., Farenbruch D.S., Borisova L.B. Statement of the problem of kinematic analysis of mechanisms, the links of which are connected by sin-



gle-contact kinematic pairs. *Mashinostroenie*. 2006; 16:71–77. EDN ORQVDD.

20. Yunusov F.S., Abdreev M.M. Methodology of analytical modeling of the formation of screw surfaces with a disk tool. *Bulletin of Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev*. 2004; 4:10–12. EDN HRLXOR.

21. Nozirzoda S.S. Ensuring the operational properties of the bladed body of the geokhod shape of the bladed working body of the geohod. *Mining equipment and electromechanics*. 2023; 3(167):49–58. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-3-49-58. EDN NDWGIW.

© 2023 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*The author declares no conflict of interest.*

*About the author:*

**Nozirzoda Shodmon S.**, Postgraduate, Assistant, Yaroslav the Wise Novgorod State University, (41 Bolshaya St. Petersburg str., Veliky Novgorod, 173003, Russia), e-mail: shoni\_1997@mail.ru

**Nikitin Evgeny I.**, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, Yaroslav the Wise Novgorod State University, (41 Bolshaya St. Petersburg str., Veliky Novgorod, 173003, Russia), e-mail: eugeny.nikitin@novsu.ru

*Contribution of the authors:*

Nozirzoda Shodmon Salohiddin - conceptualization of research, data collection and analysis, review of relevant literature, conclusions, writing a text.

Nikitin Evgeny Ivanovich - setting a scientific task, scientific management, analysis of the results, conclusions, writing a text

*Author have read and approved the final manuscript.*

