ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(2-1):197-209
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.331 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_197

АНАЛИЗ МЕТОДА ВЫЕМКИ ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ С ОТКОСА КАРЬЕРА

А.В. Михайлов[1], А.И. Смирнов[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: a.s.555@inbox.ru

Аннотация: Представлен анализ метода выемки торфяного сырья с откоса карьера с использованием гидравлического экскаватора, оборудованного обратной лопатой. Основное внимание уделено исследованию кинематики гидроманипулятора экскаватора для обеспечения выемки сырья с откоса карьера с постоянными толщиной стружки и углом позиционирования ковша. Метод Денавита–Хартенберга для решения прямой задачи кинематики позволяет преобразовать координаты ковша из связанной с ним системы координат в базовую систему координат и однозначно определить положение режущей кромки ковша в пространстве. Для решения обратной задачи кинематики используется геометрический метод, основанный на тригонометрических преобразованиях. Алгоритм включает систему уравнений, связывающую координаты движения ковша с геометрическими параметрами звеньев гидроманипулятора (стрелы, рукояти и ковша) и углами их поворота. Это обеспечивает движение ковша по заданной траектории с постоянными углом позиционирования и толщиной стружки. На основе полученных решений разработана программа на языке Python, моделирующая траекторию движения режущей кромки ковша с известными входными параметрами: геометрические характеристики экскаватора (длины звеньев) и карьера (глубина залежи, угол откоса). Результатом моделирования в программе является траектория движения режущей кромки ковша с сохранением постоянства угла позиционирования и толщины стружки, что соответствует принципам выемки торфяного сырья. Результаты проведенного исследования могут быть использованы для разработки систем автоматического контроля позиционирования ковша, что позволит повысить эффективность процесса добычи.

Ключевые слова: торфяное сырье, выемка, откос карьера, гидравлический экскаватор, кинематика гидроманипулятора, метод Денавита–Хартенберга.

Для цитирования: *Михайлов А. В., Смирнов А. И.* Анализ метода выемки торфяного сырья с откоса карьера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 2-1. – С. 197–209. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_197.

Digging method analyzing organogenic materials mining by in-pit method

A.V. Mikhailov[1], A.I. Smirnov[1]

[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: a.s.555@inbox.ru

Abstract: The article presents an analysis of a method for excavating peat raw materials from a quarry slope using a hydraulic excavator equipped with a reverse shovel. The main attention is paid to the study of the kinematics of the excavator hydraulic manipulator to ensure the extrac-

© А.В. Михайлов, А.И. Смирнов. 2026.

tion of raw materials from the slope of the quarry with a constant chip thickness and bucket positioning angle. The Denavit–Hartenberg method for solving a direct kinematics problem allows converting bucket coordinates from an associated coordinate system to a basic coordinate system and uniquely determining the position of the bucket's cutting edge in space. To solve the inverse kinematics problem, a geometric method based on trigonometric transformations is used. The algorithm includes a system of equations that relates the coordinates of the bucket movement to the geometric parameters of the hydraulic manipulator links (boom, handle and bucket) and their rotation angles. This ensures that the bucket moves along a given trajectory with a constant positioning angle and chip thickness. Based on the solutions obtained, a Python program has been developed that simulates the trajectory of the bucket's cutting edge with known input parameters: geometric characteristics of the excavator (link lengths) and the quarry (deposit depth, slope angle). The result of the simulation in the program is the trajectory of the cutting edge of the bucket while maintaining the constancy of the positioning angle and chip thickness, which corresponds to the principles of excavation of peat raw materials. The results of the research can be used to develop automatic bucket positioning control systems, which will improve the efficiency of the mining process.

Key words: peat raw materials, excavation, quarry slope, hydraulic excavator, hydraulic manipulator kinematics, Denavit–Hartenberg method.

For citation: Mikhailov A. V., Smirnov A. I. Digging method analyzing organogenic materials mining by in-pit method. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(2-1):197-209. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_197.

Введение

Наиболее распространенным экскаватором, используемым для добычи полезных ископаемых, строительных и ландшафтных работ, является гусеничный одноковшовый гидравлический экскаватор, оборудованный обратной лопатой [1—3]. Гидравлические экскаваторы обладают рациональной конструкцией для выемки торфяного сырья, обеспечивающей высокую проходимость по слабым грунтам, универсальность рабочего органа и высокую производительность, и показывают высокую эффективность их применения при прокладке автомобильных дорог через торфяные месторождения в европейских странах Северной Периферии [4—6].

Торфяные залежи северного умеренного пояса представляют собой горизонтальное напластование нескольких видов торфа, разнородных по своему составу, от подстилающих грунтов до поверхности месторождения. Стратиграфические горизонтальные пласты торфяной залежи, расположенные на разной глубине, различаются по своему физико-механическому составу, степени разложения, плотности и влажности. При этом средняя глубина торфяных месторождений низинного типа — 2,3 м; верхового типа — 4,0 м при максимальных глубинах 8,0—10,0 м [7, 8].

В работе [9] сделан вывод о том, что для производства универсальной торфяной продукции с усредненными физико-механическими характеристиками по степени разложения добычу торфа следует осуществлять со всей глубины залежи при верхней стоянке экскаватора, таким образом, чтобы ковш экскаватора [10—12] срезал стружку с откоса торфяного карьера, пересекая все стратиграфические слои торфяного месторождения. Основываясь на горно-геологических условиях, специфичных

для торфяного месторождения, проанализирован ряд технологических требований, на основе которых были сформированы принципы выемки торфяного сырья [13—15]:

• выемка торфяного сырья со всей глубины карьера до 4 м движением ковша вдоль откоса карьера снизу вверх путем срезания стружки постоянной толщины;

• управление процессом выемки путем изменения толщины стружки при соответствии объему вместимости ковша экскаватора;

• минимальное динамическое воздействие ковша на разрабатываемый откос для сохранения его устойчивости.

Известный метод планирования откоса соответствует изложенным принципам [16—18]. Продольная база экскаватора располагается параллельно бровке откоса карьера [19, 20]. Планировочный ковш прижимается задней стенкой ковша к поверхности откоса и протягивается вверх к бровке, срезая излишки грунта.

Метод планирования возможно адаптировать для выемки торфяного сырья гидравлическим экскаватором с откоса карьера [21—23]. Для этого позиционирование рабочего органа должно осуществляться таким образом, чтобы при поступательном движении ковша в плоскости откоса карьера происходило главное движение, обеспечивающее отделение грунта в направлении снизу вверх по откосу карьера с заданной толщиной срезаемой стружки и углом резания, при его полном заполнении.

При этом управление движением конечных точек звеньев гидроманипулятора экскаватора на локальном участке по заданной траектории ковша путем поворота стрелы и рукояти относительно разрабатываемого откоса [24—26] представляет собой конкретную задачу кинематики.

Цель статьи — провести анализ кинематики гидроманипулятора при выемке торфяного сырья с откоса карьера с постоянным позиционированием ковша.

Методика исследования

Экскавация торфяного сырья снизу вверх с откоса карьера осуществляется повторяющимися циклами, которые генерируют траекторию движения рабочего органа.

На рис. 1 показана параметрическая схема гидроманипулятора, наложенная на сечение откоса карьера с глубиной залежи — $H_{экск}$, углом откоса — γ. Основными геометрическими характеристиками гидроманипулятора являются: длины звеньев (рукоять — l_1, стрела — l_2, ковш — l_3), относительные углы поворота (φ_1, φ_2, φ_3) и постоянный угол позиционирования (φ_4) [27—29].

За счет независимых приводов поворота стрелы, рукояти и ковша гидроманипулятор обеспечивает требуемую точность позиционирования ковша. При поступательном движении ковша снизу вверх в плоскости откоса карьера происходит главное движение, обеспечивающее отделение грунта с постоянными толщиной стружки и углом позиционирования φ_4, которое зависит от относительного и суммарного движений всех звеньев гидроманипулятора.

Таким образом, ключевым моментом для осуществления выемки необходимо задать перемещение каждого звена гидроманипулятора, при котором обеспечивается постоянство толщины срезаемой стружки с углом позиционирования φ_4.

Известно, что положение любого тела в пространстве определяется тремя линейными координатами и тремя угловыми координатами. Ж. Денавитом и Р.С. Хартенбергом был предложен метод, с помощью которого можно пре-

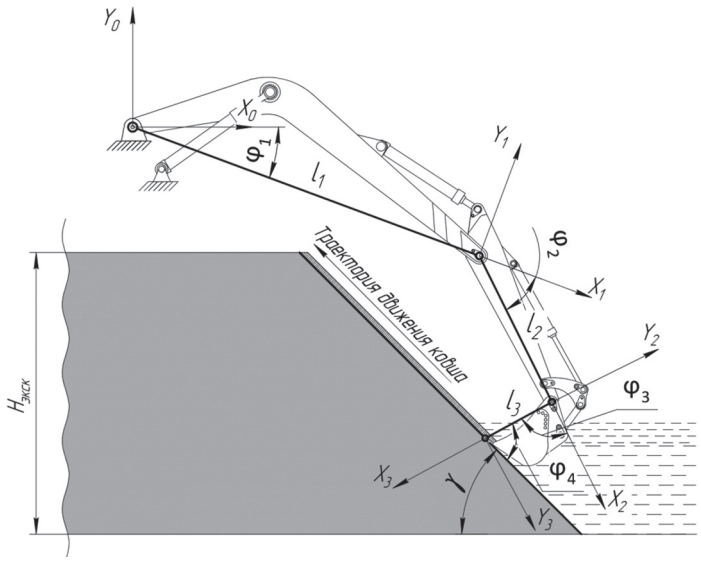

Рис. 1. Параметрическая схема гидроманипулятора [Составлено авторами]
Fig. 1. Parametric design of the hydraulic manipulator [Compiled by the authors]

образовать координаты ковша из связанной с ним системы координат в базовую систему координат и однозначно определить положение режущей кромки ковша в пространстве с помощью четырех параметров. Предложенный метод осуществляется при помощи стандартизированного алгоритма привязки систем координат к шарнирам звеньев манипулятора [30 — 32].

Для связи координат режущей кромки ковша с базовой системой координат по методу Денавита–Хартенберга составлена параметрическая схема гидроманипулятора (см. рис. 1).

При моделировании выемки система координат гидроманипулятора формируется следующим образом [33, 34]:

1) базовая система координат (x_0, y_0, z_0) связывается с базовой частью экскаватора;

2) для каждого *i*-го шарнира ось z_i направлена таким образом, чтобы она совпадала с осью вращения;

3) для каждого *i*-го шарнира ось x_i направлена перпендикулярно оси z_i и вдоль каждого *i*-го звена;

4) для каждого *i*-го шарнира направление оси y_i задается векторным произведением $\vec{y}_i = \vec{x}_i \times \vec{z}_i$;

5) координата режущей кромки ковша связана с базовой системой координат.

Параметры Денавита–Хартенберга для звеньев гидроманипулятора сведены в таблицу.

Параметры Денавита–Хартенберга звеньев гидроманипулятора [Составлено авторами]
Denavit–Hartenberg parameters of hydraulic manipulator links [Compiled by the authors]

Звено, *i*	**Длина *i*-го звена, l_i**	**Угол вокруг оси x_i от z_{i-1} до z_i, a_i**	**Расстояние вдоль оси z_{i-1} от x_{i-1} до x_i, d_i**	**Угол вокруг оси z_{i-1} от x_{i-1} до x_i, φ_i**
1 (стрела)	l1	0	0	φ_1
2 (рукоять)	l2	0	0	φ_2
3 (ковш)	l3	0	0	φ_3

При постоянных входных параметрах модели Денавита–Хартенберга регулируемыми параметрами являются углы φ_1, φ_2, φ_3 между звеньями гидроманипулятора.

Для достижения принципов выемки торфяного сырья с постоянными толщиной срезаемой стружки и углом позиционирования ковша φ_4 необходимо установить взаимосвязь между параметрами траектории движения и пространственным положением ковша относительно базовой системы координат, решив прямую и обратную задачи кинематики с использованием векторно-матричного метода.

Решение прямой задачи кинематики гидроманипулятора экскаватора

Суть решения прямой задачи кинематики гидроманипулятора экскаватора заключается в определении положения режущей кромки экскаватора по заданным длинам звеньев и углам между ними. В рамках решения прямой задачи кинематики для достижения постоянного позиционирования режущей кромки ковша экскаватора в процессе выемки торфяного сырья гидроманипулятор рассматривается как механизм с открытой кинематической цепью. Для отслеживания координат режущей кромки ковша, движущегося снизу вверх по откосу с постоянным углом позиционирования φ_4, проводится преобразование (i-1)-й системы координат в i-ю систему координат по матрице однородного преобразования для каждого i-го звена:

$$T_i = \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -c_{\alpha_i} s_{\theta_i} & s_{\alpha_i} s_{\theta_i} & l_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\alpha_i} c_{\theta_i} & -s_{\alpha_i} c_{\theta_i} & l_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $c_{\theta_1} = \cos\varphi_i$, $s_{\theta 1} = \sin\varphi_i$.

Матрица однородного преобразования T_i позволяет связать однородные координаты режущей кромки ковша K_i с однородными координатами этой точки относительно (i-1)-й системы координат, связанными с (i-1)-м звеном гидроманипулятора:

$$K_0 = T_i^{i-1} K_i, \quad (2)$$

где $K_i = \begin{bmatrix} x_i & y_i & z_i & 1 \end{bmatrix}^T$.

K_i соотносит координаты кромки ковша с базовой системой координат K_0 и приводит матрицу к единому виду. Для связи системы координат точки O_3 с началом базовой системы координат в точке O_0 производится построение соответствующей матрицы:

$$K_0 = T_3^0 K_3, \quad (3)$$

где $T_3^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2$, а $K_3 = [0\ 0\ 0\ 1]^T$.

Матрицы координат точек O_1, O_2 и O_3 для данного случая:

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} c_{\theta_1} & -s_{\theta_1} & 0 & l_1 c_{\theta_1} \\ s_{\theta_1} & c_{\theta_1} & 0 & l_1 s_{\theta_1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} c_{\theta_2} & -s_{\theta_2} & 0 & l_2 c_{\theta_2} \\ s_{\theta_2} & c_{\theta_2} & 0 & l_2 s_{\theta_2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} c_{\theta_3} & -s_{\theta_3} & 0 & l_3 c_{\theta_3} \\ s_{\theta_3} & c_{\theta_3} & 0 & l_3 s_{\theta_3} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Выражение координаты режущей кромки ковша относительно базовой системы координат K_0 после перемножения матриц:

$$K_0 = \begin{bmatrix} l_1 c_{\theta_1} - l_3 s_{\theta_3}\left(c_{\theta_1} s_{\theta_2} + c_{\theta_2} s_{\theta_1}\right) + l_2 c_{\theta_1} c_{\theta_2} - l_2 s_{\theta_1} s_{\theta_2} + l_3 c_{\theta_3}\left(c_{\theta_1} c_{\theta_2} - s_{\theta_1} s_{\theta_2}\right) \\ l_1 s_{\theta_1} + l_3 s_{\theta_3}\left(c_{\theta_1} c_{\theta_2} - s_{\theta_2} s_{\theta_1}\right) + l_2 c_{\theta_1} s_{\theta_2} + l_2 s_{\theta_1} c_{\theta_2} + l_3 c_{\theta_3}\left(c_{\theta_1} s_{\theta_2} + s_{\theta_1} c_{\theta_2}\right) \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Матрица после тригонометрических преобразований:

$$K_0 = \begin{bmatrix} l_1 c_{\theta_1} + l_2 c_{\theta_{12}} + l_3 c_{\theta_{123}} \\ l_1 s_{\theta_1} + l_2 s_{\theta_{12}} + l_3 s_{\theta_{123}} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

В итоге система уравнений координат кромки ковша в классической форме:

$$\begin{cases} x = l_1 c_{\theta_1} + l_2 c_{\theta_{12}} + l_3 c_{\theta_{123}} \\ y = l_1 s_{\theta_1} + l_2 s_{\theta_{12}} + l_3 s_{\theta_{123}} \\ z = 0 \end{cases} \quad (7)$$

где

$$c_{\theta 1} = \cos(\varphi_1);\ c_{\theta 12} = \cos(\varphi_1 + \varphi_2);\ c_{\theta 123} = \cos(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3);$$
$$s_{\theta 1} = \sin(\varphi_1);\ s_{\theta 12} = \sin(\varphi_1 + \varphi_2);\ s_{\theta 123} = \sin(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3).$$

Таким образом, система уравнений (7), основываясь на постоянных (l_1, l_2, l_3) и переменных (φ_1, φ_2, φ_3) параметрах звеньев гидроманипулятора, устанавливает взаимосвязь координаты движения режущей кромки ковша с базовой системой координат гидроманипулятора.

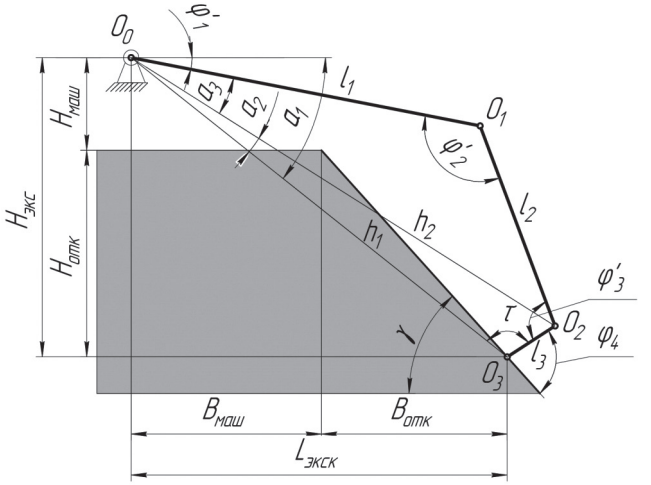

Рис. 2. Кинематическая схема гидроманипулятора [Составлено авторами]
Fig. 2. Kinematic diagram of the hydraulic manipulator [Compiled by the authors]

Анализ полученной системы уравнений показывает, что задача управления процессом выемки торфяного сырья сводится к определению совокупности углов φ_1, φ_2, φ_3 для достижения заданной траектории движения режущей кромки ковша снизу вверх по откосу карьера с постоянным углом позиционирования φ_4.

Решение обратной задачи кинематики гидроманипулятора экскаватора

Решение обратной задачи кинематики заключается в обеспечении постоянства позиционирования ковша относительно базовой системы координат на основе информации о геометрических параметрах звеньев гидроманипулятора и геометрии откоса. В результате решения обратной задачи устанавливают взаимосвязи между углами φ_1, φ_2, φ_3 и координатами режущей кромки для обеспечения заданной ориентации ковша с углом позиционирования φ_4 и требуемой траекторией движения ковша по откосу карьера, основываясь на выбранных системах координат и кинематической схеме гидроманипулятора (см. рис. 2).

Для решения обратной задачи кинематики используется геометрический метод решения, который заключается в нахождении проекций всех звеньев гидроманипулятора на вертикальную плоскость и аналитических выражений в явном виде с использованием аппарата тригонометрических функций.

Алгоритм нахождения углов φ_1, φ_2, φ_3 на основе выполнения тригонометрических преобразований представлен ниже.

1. Вертикальная координата кромки ковша:

$$H_{экс} = H_{отк} + H_{маш}, \qquad (8)$$

где $H_{отк}$ — высота откоса; $H_{маш}$ — высота базы экскаватора.

2. Заложение откоса:

$$B_{отк} = H_{отк} / (\mathrm{tg}\gamma), \qquad (9)$$

где γ — угол откоса.

3. Горизонтальная координата кромки ковша:

$$L_{экс} = B_{отк} + B_{маш}, \qquad (10)$$

где $B_{маш}$ — расстояние базы гидроманипулятора до бровки откоса.

4. Расстояние от базы гидроманипулятора до шарнира между стрелой и рукоятью:

$$h_1 = \sqrt{H_{экс}^2 + L_{экс}^2}\ . \qquad (11)$$

5. Вспомогательный угол между базой гидроманипулятора и h_1:

$$\alpha_1 = \mathrm{arctg}(H_{экс} / L_{экс}). \qquad (12)$$

6. Вспомогательный угол между h_1 и l_3:

$$\tau = 180 - (\varphi_4 + E_1 - \gamma). \qquad (13)$$

7. Расстояние от базы гидроманипулятора до шарнира между рукоятью и ковшом:

$$h_2 = \sqrt{h_1^2 + l_3^2 - 2h_1 l_3 \cos\tau}\ . \qquad (14)$$

8. Вспомогательный угол между h_1 и h_2:

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{h_1^2 + h_2^2 - L_2^2}{2h_1 h_2}\right). \qquad (15)$$

9. Вспомогательный угол между h_2 и l_1:

$$\alpha_3 = \arccos\left(\frac{L_1^2 + h_2^2 - L_2^2}{2L_1 h_2}\right). \qquad (16)$$

10. Угол между стрелой и базой гидроманипулятора:

$$\varphi_1' = \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3. \qquad (17)$$

11. Угол между стрелой и рукоятью:

$$\varphi_2' = 180 - \alpha_2 - \arccos\left(\frac{L_1^2 + h_2^2 - L_2^2}{2L_1 h_2}\right). \qquad (18)$$

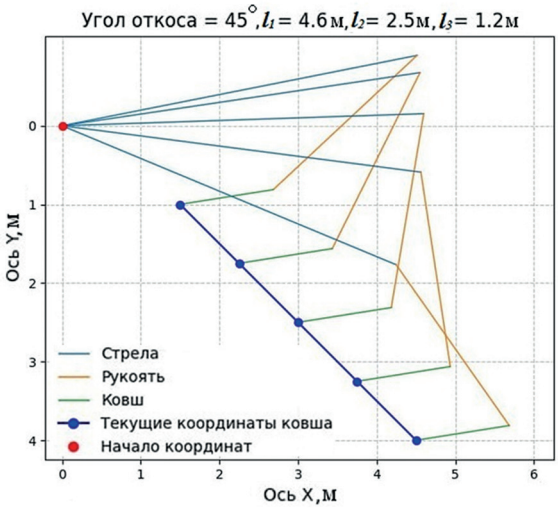

Рис. 3. Результат моделирования траектории движения режущей кромки ковша [Составлено авторами]
Fig. 3. The result of modeling the trajectory of the cutting edge of the bucket [Compiled by the authors]

12. Угол между рукоятью и ковшом:

$$\varphi_3' = 360 - \tau - \varphi_2' - (\alpha_1 - \varphi_1'). \quad (19)$$

13. В итоге текущие значения углов φ_1, φ_2, φ_3:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_1' \\ \varphi_2 = 180 - \varphi' \\ \varphi_3 = 180 - \varphi' \end{cases} \quad (20)$$

Полученный алгоритм нахождения текущих значений углов φ_1, φ_2, φ_3 соотносит координаты режущей кромки ковша в рабочем пространстве экскаватора относительно базовой системы координат, при постоянном угле позиционирования φ_4 относительно разрабатываемого откоса карьера.

Результаты

Решения прямой и обратной задач кинематики гидроманипулятора экскаватора для движения режущей кромки ковша по откосу карьера связывают координаты и траекторию движения относительно базовой системы координат.

На основе полученных решений кинематики разработана программа [35], написанная на языке Python, в которой моделируется движение режущей кромки ковша снизу вверх по откосу карьера с постоянными толщиной стружки и углом позиционирования φ_4 с известными входными данными (длины звеньев рукояти — l_1, стрелы — l_2, ковша — l_3, глубина залежи $H_{экск}$ и угол откоса γ).

Результатом моделирования в программе является траектория движения режущей кромки ковша снизу вверх по откосу с постоянными углом позиционирования φ_4 и толщиной срезаемой стружки (рис. 3).

Анализ результата моделирования траектории движения ковша показывает, что при правильном соотношении входных данных гидроманипулятор осуществляет выемку торфяного сырья снизу вверх по откосу карьера с постоянными толщиной стружки и углом позиционирования φ_4, обеспечивая выполнение принципов выемки торфяного сырья. Постоянство угла позиционирования φ_4 обеспечивается изменением текущих значений углов φ_1, φ_2 и φ_3. В случае необходимости корректировка траектории движения режущей кромки ковша осу-

ществляется изменением углов между звеньями путем выдвижения штоков силовых гидроцилиндров каждого звена.

Таким образом, решение прямой и обратной задач для гидроманипулятора экскаватора, производящего выемку торфяного сырья с откоса карьера, сводится к заданию координат траектории движения всех его звеньев.

Заключение

В результате выполненного исследования проведен анализ кинематики гидроманипулятора экскаватора при выемке торфяного сырья с откоса карьера снизу вверх. Выемка торфяного сырья осуществляется гидравлическим экскаватором, оборудованным обратной лопатой, снизу вверх по откосу карьера с постоянным позиционированием ковша относительно плоскости откоса. Решение прямой и обратной задач кинематики гидроманипулятора экскаватора заложено в программу в виде алгоритма анализа достижения заданной траектории движения режущей кромки ковша при постоянных параметрах геометрии звеньев гидроманипулятора и откоса карьера.

Полученные закономерности движения звеньев гидроманипулятора могут быть основой для создания системной математической модели автоматического копания одноковшовым гидравлическим экскаватором с применением искусственного интеллекта. Дальнейшее исследование по совершенствованию процесса выемки торфяного сырья с откоса карьера будут связаны с определением нагрузок на рабочем органе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В. В.*, *Дзюрич Д. О.* Обоснование параметров технологической схемы разработки обводненных месторождений строительного песка // Записки Горного института. — 2022. — Т. 253. — С. 33—40. DOI: 10.31897/PMI.2022.3.

2. *Patel B. P.*, *Prajapati J. M.* Soil-tool interaction as a review for digging operation of mini hydraulic excavator // International Journal of Engineering Science and Technology. 2011, vol. 3, no. 2, pp. 894—901.

3. *Хамидов О. У.*, *Шибанов Д. А.*, *Шишкин П. В.*, *Колпаков В. О.* Эффективность применения экскаваторов на карьерах Узбекистана // Горная промышленность. — 2024. — № 5. — С. 135—142. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5-135-142.

4. *Munro R.* Dealing with bearing capacity problems on low volume roads constructed on peat. The Highland Council, Transport, Environmental & Community Service, HQ, Glenurquhart Road, Inverness IV3 5NX Scotland. 2004, 136 p.

5. *Великанов В. С.* Прогнозирование нагруженности рабочего оборудования карьерного экскаватора по нечетко-логистической модели // Записки Горного института. — 2020. — Т. 241. — С. 29. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.29.

6. *Невзоров Д. Н.*, *Труфанова И. С.* Повышение эффективности работы конвейерного поезда: исследование влияния параметров приводной станции на силу сцепления // Горная промышленность. — 2025. — № 1. — С. 184—191. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1-184-191.

7. *Кузьмин Г. Ф.*, *Селеннов В. Г.*, *Созинова Л. А.* Торфяные месторождения России. Экология. Разведка. Использование. — СПб.: Свет, 2019. — 388 с.

8. *Хамидов О. У.*, *Шибанов Д. А.* Техническое обслуживание и ремонт карьерных экскаваторов по регламенту с учетом фактических условий и режимов их эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 12-3. — С. 152—167. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_123_0_152.

9. *Михайлов А. В.*, *Смирнов А. И.*, *Ал-Аттар М. Т.* Анализ технологических требований к карьерной выемке органогенного материала // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. — 2025. — № 31. — С. 119—124. DOI: 10.26160/2658-3305-2025-31-119-124.

10. *Шешукова Е. И.*, *Шибанов Д. А.*, *Иванов С. Л.*, *Шишкин П. В.* Оценка нагрузок приводов рабочего оборудования карьерного экскаватора (часть 2) // Горная промышленность. — 2024. — № 4. — С. 108—114. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-4-108-114.

11. *Drebenstedt C.* The responsible mining concept — contributions on the interface between science and practical needs // Mine Planning and Equipment Selection, Springer Cham. 2014, pp. 3—24. DOI: 10.1007/978-3-319-02678-7-1.

12. *Litvinenko V. S.*, *Dvoynikov M. V.*, *Trushko V. L.* Elaboration of a conceptual solution for the development of the Arctic shelf from seasonally flooded coastal areas // International Journal of Mining Science and Technology. 2021, no. 32, pp. 113—119. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.09.010.

13. *Jurasinski G., Sate Ahmad, Alba Anadon-Rosell, Jacqueline Berendt, etc.* From understanding to sustainable use of peatlands: The WETSCAPES approach // Soil Systems. 2020, vol. 4, no. 14. DOI: 10.20944/preprints202001.0250.v2.

14. *Пашкевич М. А.*, *Данилов А. С.* Экологическая безопасность и устойчивое развитие // Записки Горного института. — 2023. — Т. 260. — С. 153—154.

15. *Mitrev R., Marinkovic D.* Numerical study of the hydraulic excavator overturning stability during performing lifting operations // Advances in Mechanical Engineering. 2019, vol. 11, no. 5. DOI: 10.1177/1687814019841779.

16. *Yaguang Zhu, Liang Zhang, Wanjin Guo, Zhengcang Chen* Trajectory planning for periodic operation of autonomous excavating robot based on time-jerk synthetic optimum // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018, vol. 428, no. 1, article 012067. DOI: 10.1088/1757-899X/428/1/012067.

17. *Якупов Д. Р.*, *Иванова П. В.*, *Иванов С. Л.* К вопросу оценки параметров элементов комплекса горного оборудования для отработки блоков торфяного месторождения обратным ходом // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 10. — С. 88—103. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_10_0_88.

18. *Mario K., Dalibor K.* Construction and testing of the measurement system for excavator productivity // The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin. 2019, pp. 51—58. DOI: 10.17794/rgn.2019.2.6.

19. *Jiaqi Xu, Hwan-Sik Yoon* A review on mechanical and hydraulic system modeling of excavator manipulator system // Journal of Construction Engineering. 2016, pp. 1—11. DOI: 10.1155/2016/9409370.

20. *Liang Shuai-shuai, Zhang Dong-sheng, Fan Gang-wei, Kovalsky Evgeny, Fan Zhang-lei, Zhang Lei, Han Xue-sen* Mechanical structure and seepage stability of confined floor response to longwall mining of inclined coal seam // Journal of Central South University. 2023, vol. 30, no. 9, pp. 2948–2965. DOI: 10.1007/s11771-023-5429-y.

21. *Wang X., Sun H., Feng M., Ren Z., Liu J.* Dynamic analysis of working device of excavator under limit digging force // Journal of The Institution of Engineers (India): Series C. 2021, vol. 102, pp. 1137—1144. DOI: 10.1007/s40032-021-00725-4.

22. *Jilin He, Xin Zhao, Daqing Zhang, Qinghua He* The hardware-in-loop simulation research on trajectory control and modeling parameter estimation of working device of hydraulic excavator / Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA. 2010, pp. 1214—1219. DOI: 10.1109/ICMA.2010.5588594.

23. *Bender F. A.*, *Goltz S., Braunl T., Sawodny O.* Modeling and offset-free model predictive control of a hydraulic mini excavator // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2017, vol. 14, pp. 1682—1694. DOI: 10.1109/tase.2017.2700407.

24. *Singh S. P.*, *Narendrula R.* Factors affecting the productivity of loaders in surface mines // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2006, vol. 20, pp. 20—32. DOI: 10.1080/13895260500261574.

25. *He Q., Hao P., Zhang D.* Modeling and parameter estimation for hydraulic system of excavator's arm // Journal of Central South University of Technology. 2008, vol. 15, pp. 382—386. DOI: 10.1007/s11771-008-0072-1.

26. *Jhunjhunu, Rajasthan, Xu Jiaqi, Yoon Hwan-Sik* A review on mechanical and hydraulic system modeling of excavator manipulator system // Journal of Construction Engineering. 2016, pp. 1—11. DOI: 10.1155/2016/9409370.

27. *Zhang Bin, Wang Shuang, Liu Yuting, Yang Huayong* Research on trajectory planning and autodig of hydraulic excavator // Mathematical Problems in Engineering. 2017, pp. 1—10. DOI: 10.1155/2017/7139858.

28. *Vechet S., Krejsa J.* Hydraulic arm modeling via matlab simhydraulics // Engineering Mechanics. 2009, vol. 16, no. 4, pp. 287—296.

29. *Шеховцова Д. А.*, *Комаров Е. Д.* Математическое моделирование динамической системы одноковшового экскаватора с гидроприводом в Matlab // Омский научный вестник. — 2014. — № 3. — С. 147—151.

30. *Лиморенко М. Е.*, *Подчасов О. В.*, *Подчасов Е. О.*, *Терентьева А. Д.* Повышение точности работ одноковшового экскаватора путем внесения корректировок в систему управления // Агроинженерия. — 2018. — № 6. — С. 32—39. DOI: 10.26897/1728-7936-2018-6-32-39.

31. *Терентьева А. Д.* Оценка влияния динамических характеристик на работу машинного агрегата с гидроприводом // Машиностроение и компьютерные технологии. — 2018. — № 4. — С. 1—12. DOI: 10.24108/0418.0001354.

32. *Подчасов О. В.*, *Подчасов Е. О.*, *Терентьева А. Д.* Оценка влияния динамических характеристик на точность работы одноковшового экскаватора при разработке участков точного земледелия // Агроинженерия. — 2018. — № 4. — С. 26—32. DOI: 10.26897/1728.7936.2018.4.26.32.

33. *Ma W., Ma S., Qiao W., Cao D., Yin C.* Research on PID controller of excavator electro-hydraulic system based on improved differential evolution // Machines. 2023, vol. 11, article 143. DOI: 10.3390/machines11020143.

34. *Гурко А. Г.* Математическая модель манипулятора экскаватора с обратной лопатой // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. — 2011. — № 55. — С. 79—89.

35. *Михайлов А. В.*, *Смирнов А. И.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ № 2025612747, 04.02.2025. Программа для оценки степени усреднения торфяного сырья в ковше экскаватора. 2024. Бюл. № 2. ГИАБ

REFERENCES

1. Ivanov V. V., Dzyurich D. O. Justification of the technological scheme parameters for the development of flooded deposits of construction sand. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 253, pp. 33—40. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.3.

2. Patel B. P., Prajapati J. M. Soil-tool interaction as a review for digging operation of mini hydraulic excavator. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2011, vol. 3, no. 2, pp. 894—901.

3. Khamidov O. U., Shibanov D. A., Shishkin P. V., Kolpakov V. O. Efficiency of excavators application in open-pit mines of Uzbekistan. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 5, pp. 135—142. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5-135-142.

4. Munro R. *Dealing with bearing capacity problems on low volume roads constructed on peat*. The Highland Council, Transport, Environmental & Community Service, HQ, Glenurquhart Road, Inverness IV3 5NX Scotland. 2004, 136 p.

5. Velikanov V. S. Mining excavator working equipment load forecasting according to a fuzzy-logistic model. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 241, pp. 29. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.29.

6. Nevzorov D. N., Trufanova I. S. Improving the efficiency of the conveyor train: investigation of the impact of the drive station parameters on the traction force. *Russian Mining Industry Journal*. 2025, no. 1, pp. 184—191. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1-184-191.

7. Kuz'min G. F., Selennov V. G., Sozinova L. A. *Torfyanye mestorozhdeniya Rossii. Ekologiya. Razvedka. Ispol'zovanie* [Peat deposits of Russia. Ecology. Intelligence service. Using], Saint-Petersburg, 2019, 388 p.

8. Khamidov O. U., Shibanov D. A. Regulated maintenance and repair of quarry excavators considering real-world conditions and operating modes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 12-3, pp. 152—167. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_123_0_152.

9. Mikhailov A. V., Smirnov A. I., Al-Atar M. T. Analysis of technological requirements for organogenic material quarrying. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2025, no. 31, pp. 119—124. [In Russ]. DOI: 10.26160/2658-3305-2025-31-119-124.

10. Sheshukova E. I., Shibanov D. A., Ivanov S. L., Shishkin P. V. Assessment of loads at the working attachment of a mine shovel (Part 2). *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 4, pp. 108—114. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-4-108-114.

11. Drebenstedt C. *The responsible mining concept — contributions on the interface between science and practical needs*. Mine Planning and Equipment Selection, Springer Cham. 2014, pp. 3—24. DOI: 10.1007/978-3-319-02678-7-1.

12. Litvinenko V. S., Dvoynikov M. V., Trushko V. L. Elaboration of a conceptual solution for the development of the Arctic shelf from seasonally flooded coastal areas. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2021, no. 32, pp. 113—119. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.09.010.

13. Jurasinski G., Sate Ahmad, Alba Anadon-Rosell, Jacqueline Berendt, etc. From understanding to sustainable use of peatlands: The WETSCAPES approach. *Soil Systems*. 2020, vol. 4, no. 14. DOI: 10.20944/preprints202001.0250.v2.

14. Pashkevich M. A., Danilov A. S. Ecological safety and sustainable development. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 260, pp. 153—154. [In Russ].

15. Mitrev R., Marinkovic D. Numerical study of the hydraulic excavator overturning stability during performing lifting operations. *Advances in Mechanical Engineering*. 2019, vol. 11, no. 5. DOI: 10.1177/1687814019841779.

16. Yaguang Zhu, Liang Zhang, Wanjin Guo, Zhengcang Chen Trajectory planning for periodic operation of autonomous excavating robot based on time-jerk synthetic optimum. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 428, no. 1, article 012067. DOI: 10.1088/1757-899X/428/1/012067.

17. Iakupov D. R., Ivanova P. V., Ivanov S. L. Estimate of parameters of retreat cutting equipment components for peatlands. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 10, pp. 88—103. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_10_0_88.

18. Mario K., Dalibor K. Construction and testing of the measurement system for excavator productivity. *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin*. 2019, pp. 51—58. DOI: 10.17794/rgn.2019.2.6.

19. Jiaqi Xu, Hwan-Sik Yoon. A review on mechanical and hydraulic system modeling of excavator manipulator system. *Journal of Construction Engineering*. 2016, pp. 1—11. DOI: 10.1155/2016/9409370.

20. Liang Shuai-shuai, Zhang Dong-sheng, Fan Gang-wei, Kovalsky Evgeny, Fan Zhang-lei, Zhang Lei, Han Xue-sen Mechanical structure and seepage stability of confined floor response to longwall mining of inclined coal seam. *Journal of Central South University*. 2023, vol. 30, no. 9, pp. 2948–2965. DOI: 10.1007/s11771-023-5429-y.

21. Wang X., Sun H., Feng M., Ren Z., Liu J. Dynamic analysis of working device of excavator under limit digging force. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. 2021, vol. 102, pp. 1137—1144. DOI: 10.1007/s40032-021-00725-4.

22. Jilin He, Xin Zhao, Daqing Zhang, Qinghua He The hardware-in-loop simulation research on trajectory control and modeling parameter estimation of working device of hydraulic excavator. *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA*. 2010, pp. 1214—1219. DOI: 10.1109/ICMA.2010.5588594.

23. Bender F. A., Goltz S., Braunl T., Sawodny O. Modeling and offset-free model predictive control of a hydraulic mini excavator. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2017, vol. 14, pp. 1682—1694. DOI: 10.1109/tase.2017.2700407.

24. Singh S. P., Narendrula R. Factors affecting the productivity of loaders in surface mines. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment.* 2006, vol. 20, pp. 20—32. DOI: 10.1080/13895260500261574.

25. He Q., Hao P., Zhang D. Modeling and parameter estimation for hydraulic system of excavator's arm. *Journal of Central South University of Technology*. 2008, vol. 15, pp. 382—386. DOI: 10.1007/s11771-008-0072-1.

26. Jhunjhunu, Rajasthan, Xu Jiaqi, Yoon Hwan-Sik A review on mechanical and hydraulic system modeling of excavator manipulator system. *Journal of Construction Engineering*. 2016, pp. 1—11. DOI: 10.1155/2016/9409370.

27. Zhang Bin, Wang Shuang, Liu Yuting, Yang Huayong Research on trajectory planning and autodig of hydraulic excavator. *Mathematical Problems in Engineering*. 2017, pp. 1—10. DOI: 10.1155/2017/7139858.

28. Vechet S., Krejsa J. Hydraulic arm modeling via matlab simhydraulics. *Engineering Mechanics*. 2009, vol. 16, no. 4, pp. 287 — 296.
29. Shekhovtsova D. A., Komarov E. D. Mathematical modeling of the dynamic system of a single-bucket excavator with hydraulic drive in Matlab. *Omsk Scientific Bulletin*. 2014, no. 3, pp. 147 — 151. [In Russ].
30. Limorenko M. E., Podchasov O. V., Podchasov E. O., Terentyeva A. D. Improving the accuracy of a single-bucket excavator by making adjustments to the control system. *Agroengineering*. 2018, no. 6, pp. 32 — 39. [In Russ]. DOI: 10.26897/1728-7936-2018-6-32-39.
31. Terentyeva A. D. Evaluation of the influence of dynamic characteristics on the operation of a hydraulic-driven machine unit. *Mechanical engineering and computer technologies*. 2018, no. 4, pp. 1 — 12. [In Russ]. DOI: 10.24108/0418.0001354.
32. Podchasov O. V., Podchasov E. O., Terentyeva A. D. Evaluation of the influence of dynamic characteristics on the accuracy of a single-bucket excavator in the development of precision farming sites. *Agroengineering*. 2018, no. 4, pp. 26 — 32. [In Russ]. DOI: 10.26897/1728.7936.2018.4.26.32.
33. Ma W., Ma S., Qiao W., Cao D., Yin C. Research on PID controller of excavator electro-hydraulic system based on improved differential evolution. *Machines*. 2023, vol. 11, article 143. DOI: 10.3390/machines11020143.
34. Gurko A. G. Mathematical model of an excavator manipulator with a reverse shovel. *Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Road University*. 2011, no. 55, pp. 79 — 89. [In Russ].
35. Mikhailov A. V., Smirnov A. I. *Certificate of State Registration of a Computer Program RU 2025612747*, 04.02.2025. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Михайлов Александр Викторович[1] — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: Mikhaylov_AV@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0516-7737,
Смирнов Андрей Игоревич[1] — аспирант,
e-mail: s235065@stud.spmi.ru,
ORCID ID: 0009-0004-5609-9246,
[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.
Для контактов: Смирнов А.И., e-mail: a.s.555@inbox.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.V. Mikhailov[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: Mikhaylov_AV@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0516-7737,
A.I. Smirnov[1], Graduate Student,
e-mail: s235065@stud.spmi.ru,
ORCID ID: 0009-0004-5609-9246,
[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
Saint-Petersburg, 199106, Russia.
Corresponding author: A.I. Smirnov, e-mail: a.s.555@inbox.ru.

Получена редакцией 09.11.2025; получена после рецензии 28.12.2025; принята к печати 19.01.2026.
Received by the editors 09.11.2025; received after the review 28.12.2025; accepted for printing 19.01.2026.