

Научная статья

УДК 622.6

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-2-66-76

Мамаева Мария Сергеевна¹, Хорешок Алексей Алексеевич², Удалова Юлия Сергеевна¹¹ Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевск² Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

* для корреспонденции: art@mmamaeva.ru

ОБОСНОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ЭКСКАВАЦИИ ВЛАЖНЫХ СУГЛИНКОВ**Аннотация.**

В статье представлен системный обзор современных подходов к моделированию процесса черпания влажосодержащих грунтов (пылеватых суглинков с влажностью 18–22%) гидравлическим экскаватором типа «обратная лопата». Рассмотрены методы кинематического анализа рабочего оборудования на основе формализма Денавита – Хартенберга, а также ключевые направления математического моделирования взаимодействия ковша с грунтом: от классических теорий предельного равновесия до современных численных методов – метода дискретных элементов (МДЭ/DEM) и метода конечных элементов (FEM). Особое внимание уделено проблеме интеграции разнородных моделей – аналитических, численных и физических – для повышения достоверности прогноза налипания и коэффициента заполнения ковша. Продемонстрировано, что изолированные подходы обладают существенными ограничениями: классические теории не учитывают динамику процесса и адгезию, а численные модели требуют тщательной калибровки по экспериментальным данным. В работе описана разработка специализированного электронного измерительного устройства для количественной оценки синхронизированную регистрацию влажности и динамики налипания в реальном времени. Показано, что комплексный подход, сочетающий кинематику, реологию грунта, геометрию ковша и экспериментальную валидацию, позволяет преодолеть ограничения изолированных методов. Предложена концепция цифрового двойника рабочего оборудования, интегрирующего кинематическую модель, реологические параметры грунта и данные с датчиков для прогнозирования производительности карьерных выемочных машин в сложных горнотехнических условиях, где потери из-за налипания достигают 15–25%. Результаты исследования создают методологическую основу для разработки адаптивных систем управления, способных автоматически компенсировать влияние налипания и поддерживать высокий коэффициент заполнения ковша даже при работе с проблемными влажными грунтами.

**Информация о статье**

Поступила:

15 января 2026 г.

Одобрена после рецензирования:

15 марта 2026 г.

Принята к печати:

15 апреля 2026 г.

Опубликована:

04 июня 2026 г.

Ключевые слова:

обратная лопата, влажосодержащие грунты, налипание, коэффициент заполнения, кинематика, DEM, численное моделирование, интеграция моделей, пылеватый суглинок

Для цитирования: Мамаева М.С., Хорешок А.А., Удалова Ю.С. Обоснование комбинированных цифровых моделей процесса экскавации влажных суглинков // Горное оборудование и электромеханика. 2026. № 2 (184). С. 66-76. DOI: 10.26730/1816-4528-2026-2-66-76, EDN: LIOWMB

Введение

Повышение эффективности эксплуатации горных машин базируется на показателях производительности, надежности, энергетической эффективности, а также безопасности персонала. Вопросы

повышения надежности, как представлено в работах [1, 2], достигаются за счет адекватной стратегии технического обслуживания и мониторинга диагностических параметров горных машин.

Энергетическая эффективность заключается в минимизации непроизводительных потерь на трение, нагрев, холостой ход и прочее, как отмечается в работах [3, 4].

Производительность работы землеройных машин, в частности гидравлических экскаваторов типа «обратная лопата», напрямую зависит от условий взаимодействия их рабочего оборудования с разрабатываемым грунтом. Одной из наиболее острых проблем, возникающих при эксплуатации в умеренном климате, является работа с влагосодержащими связными грунтами, такими как пылеватые суглинки, влажностью в диапазоне 18–22%. В этом интервале грунт достигает максимальной пластичности и липкости, что приводит к интенсивному налипанию на внутренние поверхности ковша. Это явление имеет серьезные технологические и экономические последствия: снижается коэффициент наполнения k_z , увеличивается собственная масса ковша за счет накопления остатков грунта, растут изгибающие моменты на стреле и рукояти, повышаются энергозатраты, а также возникает необходимость в дополнительных простоях на очистку. По данным горных предприятий Кузбасса, совокупные потери производительности в весенний и осенний периоды могут достигать 15–25% [5, 6], что делает задачу минимизации налипания одной из приоритетных в области горного машиностроения.

Традиционно для оценки взаимодействия ковша с грунтом использовались эмпирические методы, основанные на фундаментальных характеристиках грунта – сцеплении (c) и угле внутреннего трения (φ) по ГОСТ 12248-2010. Эти подходы, уходящие корнями в классическую механику грунтов, позволяют оценить усилия сопротивления копанью, однако совершенно не учитывают динамический характер реального процесса, конкретную геометрию ковша (угол щек, радиусы скругления) и, главное, физику адгезионного взаимодействия между влажным грунтом и металлической поверхностью. В результате такие расчеты дают лишь грубую оценку и не позволяют прогнозировать именно налипание.

С развитием вычислительной техники широкое распространение получили методы численного моделирования, в первую очередь метод дискретных элементов (МДЭ) [7, 8]. МДЭ позволяет рассматривать грунт как совокупность отдельных частиц, что дает возможность детально визуализировать траектории их движения, выявлять «мертвые зоны» внутри ковша и оценивать распределение напряжений. Для моделирования влагосодержащих грунтов вводятся специальные контактные законы, учитывающие капиллярные силы. Несмотря на всю свою привлекательность, МДЭ обладает фатальным недостатком – крайней чувствительностью к входным параметрам. Без тщательной калибровки по реальным экспериментальным данным такие модели могут давать ошибку до 30–40%, теряя свою прогностическую ценность.

Третий путь – проведение полноразмерных стендовых испытаний. Хотя этот метод и дает са-

мые достоверные результаты, он крайне затратен и трудоемок, требует привлечения дорогостоящей техники и персонала. Как правило, такие испытания проводятся на завершающем этапе проектирования, когда внесение изменений в конструкцию становится экономически нецелесообразным.

В этой связи особую значимость приобретает интегративный подход, который сочетает точное кинематическое описание движения ковша (например, на основе формализма Денавита – Хартенберга) с физически обоснованным моделированием взаимодействия с грунтом и, что самое важное, валидацией моделей на основе количественных экспериментальных данных. Цель настоящей статьи – провести обзор современных методов моделирования процесса черпания влагосодержащих грунтов и показать, как их интеграция на единой кинематической основе позволяет преодолеть ограничения изолированных подходов и обеспечить инженерно-точную оценку производительности землеройных машин в сложных условиях.

Методы

Для моделирования процесса черпания гидравлического экскаватора типа «обратная лопата» необходимо проанализировать процесс перемещения звеньев рабочего оборудования. Полный процесс работы одноковшового экскаватора является циклическим и состоит из нескольких последовательных операций: передвижения экскаватора к забою, черпания грунта ковшем и процесса разгрузки ковша экскаватора. Для исследования черпания влагосодержащих грунтов и влияния налипания горной массы на металлические поверхности ковша экскаватора достаточно рассмотреть процесс разработки и перемещения грунта, который состоит из следующих операций [9, 10]:

- выбор метода черпания с последующим позиционированием стрелы рукояти и ковша под необходимыми углами;
- процесс черпания грунта (загрузки ковша);

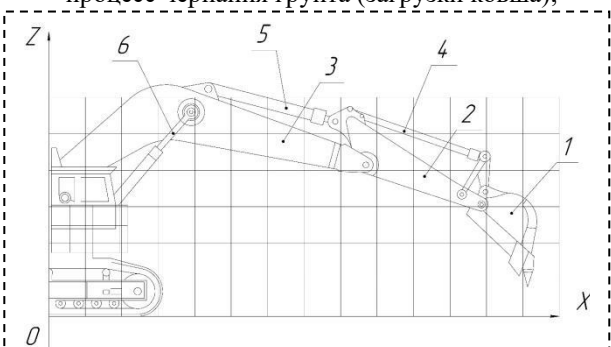


Рис. 1. Компоненты рабочего оборудования гидравлического экскаватора типа «обратная лопата» 1 – ковш, 2 – рукоять, 3 – стрела; 4 – гидроцилиндр поворота ковша, 5 – гидроцилиндр поворота рукояти, 6 – гидроцилиндр поворота стрелы.

Fig. 1. Components of the working equipment of a hydraulic backhoe excavator: 1 – bucket, 2 – arm, 3 – boom; 4 – bucket rotation hydraulic cylinder, 5 – arm rotation hydraulic cylinder, 6 – boom rotation hydraulic cylinder.

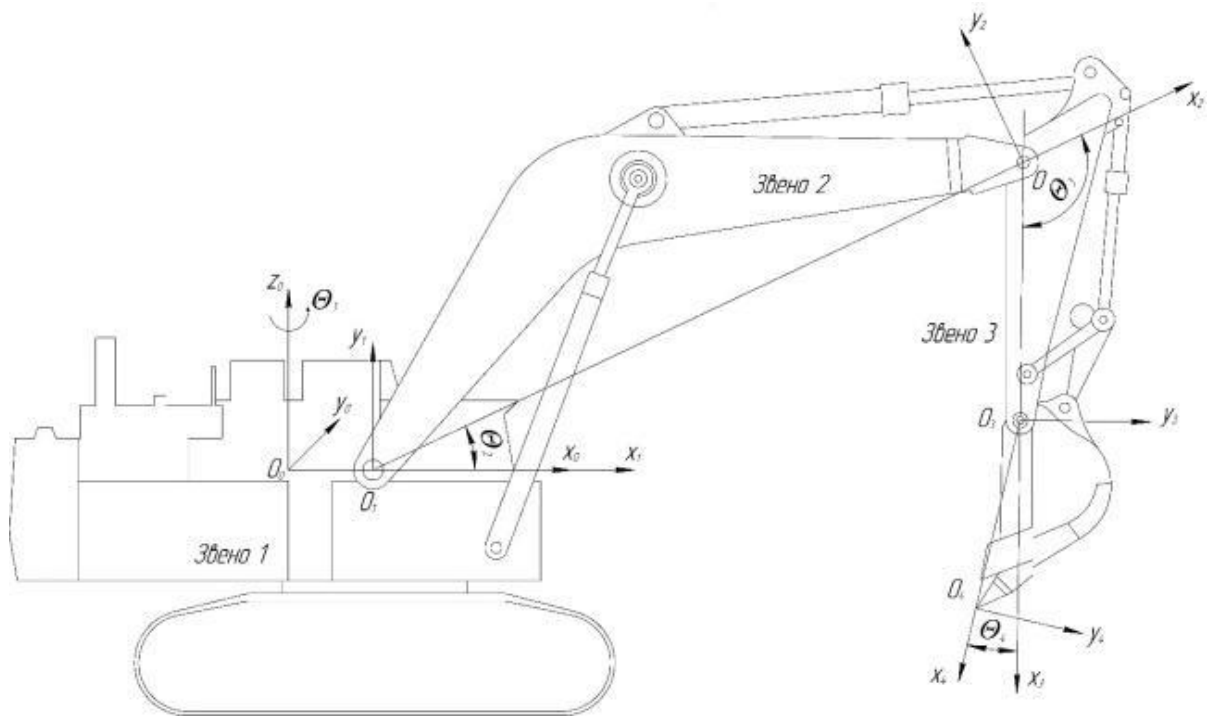


Рис. 2. Кинематическая схема гидравлического одноковшового экскаватора типа «обратная лопата»
 Fig. 2. Kinematic diagram of a hydraulic backhoe excavator

- выведение заполненного ковша из забоя;
- перемещение заполненного ковша к месту разгрузки;
- разгрузка ковша в отвал или в транспортное средство;
- перемещение ковша к забою.

Каждая из этих операций оказывает значительное влияние на моделирование процесса черпания и характеризуется разными параметрами, такими как усилие внедрения ковша в грунт, сила резания грунта, сила, необходимая для перемещения грунта перед ковшем, силы трения, параметры грунта и т. п. Важно отметить, что физико-механические свойства грунта имеют непосредственное прямое влияние на выбор метода черпания и существенно определяют силы, действующие на ковш, а значит, и на производительность экскаватора [11, 12].

Также при моделировании нужно учитывать перемещение и габаритные размеры основных компонентов рабочего оборудования гидравлического экскаватора типа «обратная лопата». Компоненты рабочего оборудования представлены на Рис. 1.

При моделировании процессов черпания гидравлическими экскаваторами влажосодержащих грунтов существенное значение имеет позиционирование ковша и построение кинематической схемы для оценки и контроля точного положения крайней кромки ковша [7, 13]. Для точного анализа процесса черпания грунта гидравлическими экскаваторами типа «обратная лопата» рабочее оборудование представленного экскаватора можно описать как манипулятор с тремя степенями свободы.

Количество степеней свободы кинематической цепи будет рассчитываться по следующей формуле:

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1 = 6n - \sum_{i=1}^5 ip_i, \quad (1)$$

где p_i – число кинематических пар i -го класса; n – число подвижных звеньев.

$$W = 6 * 3 - 5 * 3 - 4 * 0 - 3 * 0 - 2 * 0 - 0 = 18 - 15 = 3$$

Для аналитического описания изменения пространственного положения компонентов рабочего оборудования во времени определим его кинематические характеристики [14, 15]. Для построения кинематической схемы был использован векторно-матричный метод Денавита – Хартенберга. Этот метод позволяет последовательно преобразовать координаты компонентов рабочего оборудования из связанной с ними системы координат в базовую систему координат. Базовую систему координат (x_0, y_0, z_0) свяжем с базовой частью экскаватора, направив ось z_0 вдоль оси поворота базовой части экскаватора (Рис. 2). Каждую последующую i -ю систему координат $i = \overline{1,4}$ для разных компонентов (стрела, рукоять, ковш) сформируем на основе следующих трех правил:

- 1) ось z_{i-1} направлена вдоль оси i -го сочленения;
- 2) ось x_i перпендикулярна оси z_{i-1} и направлена от нее;
- 3) ось y_i дополняет оси ось x_i и ось z_i до правой декартовой системы координат.

Однородная матрица преобразования будет иметь вид:

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & S_{\alpha_i} \cos \alpha_i d_i & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где θ_i – угол поворота вокруг оси z_{i-1} , чтобы ось x_{i-1} стала сонаправленной с осью x_i ; d_i – величина сдвига вдоль оси x_i до совмещения осей x_{i-1} и x_i ; a_i – расстояние между соседними

началами координат; α_i – такой угол поворота вокруг оси x_i , в результате которого достигается совпадение систем координат [7, 16].

Значения параметров систем координат основных компонентов экскаватора приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Параметры систем координат основных компонентов экскаватора

Table 1. Parameters of coordinate systems of the main components of the excavator

i-компонент	θ_i	α_i	a_i	d_i
1 (база)	θ_1	$-\pi/2$	l_1	0
2 (стрела)	θ_2	0	l_2	0
3 (рукоять)	θ_3	0	l_3	0
4 (ковш)	θ_4	0	l_4	0

Учитывая, что в процессе черпания угол поворота базовой части экскаватора относительно вертикальной оси не меняется, а углы поворота стрелы, рукояти и ковша переменны, для расчета необходимо учитывать связь однородных координат произвольной точки P_i с однородными координатами этой точки относительно (i-1) системы отсчета, связанной с (i-1)-м звеном манипулятора экскаватора. Уравнение связи будет выглядеть следующим образом:

$$P_{i-1} = A_i^{i-1} P_i \quad (3)$$

где $P_{i-1} = (x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})^T$ и $P_i = (x_i, y_i, z_i)^T$, верхний индекс T – символ транспонирования.

Связь точек O_0 и O_4 , звеньев базы и ковша, представляющих собой начала координат, описывается следующим образом:

$$P_{O_1} = A_4^0 P_{O_4},$$

где $A_4^0 = A_1^0 A_2^1 A_3^2 A_4^3$, а $P_{O_4} = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$.

Для получения координат в явном виде $P_{O_i}, i = \overline{1,4}$, матрица A_1^0 будет равна:

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & l_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & l_1 \sin \theta_1 \\ & 0 & 1 & 0 \\ & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

а однородные матрицы A_i^{i-1} при $P_{O_i}, i = \overline{2,4}$ получаются следующим образом:

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & l_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & l_i \sin \theta_i \\ & 0 & 0 & 1 \\ & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, i = \overline{2,4}.$$

Тогда $P_{O_1}^{O_0} = A_1^0 P_{O_1} = [l_1 \cos \theta_1 \ l_1 \sin \theta_1 \ 0 \ 1]^T$;

$P_{O_2}^{O_0} = A_1^0 A_2^1 P_{O_2} = [l_1 + l_2 \cos \theta_2 \ 0 \ l_2 \sin \theta_2 \ 1]^T$;

$$P_{O_3}^{O_0} = A_1^0 A_2^1 A_3^2 P_{O_3} = \begin{bmatrix} l_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_{23} \\ 0 \\ l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_{23} \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$P_{O_4}^{O_0} = A_1^0 A_2^1 A_3^2 A_4^3 P_{O_4} = \begin{bmatrix} l_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_{23} + l_4 \cos \theta_{234} \\ 0 \\ l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_{23} + l_4 \sin \theta_{234} \\ 1 \end{bmatrix},$$

где $\theta_{23} = \theta_2 + \theta_3$, а $\theta_{234} = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4$.

Моделирование взаимодействия ковша с влаго-содержащим грунтом – сложная многомасштабная задача, требующая учета как макро-механической

кинematики, так и микроскопических свойств материала [17, 18]. Современные подходы можно разделить на три уровня.

Классический подход (макроуровень) основан на теории предельного равновесия сыпучих сред (Кулон, Рэнкин, Соколовский). Грунт рассматривается как сплошная среда с параметрами c (сцепление) и φ (угол внутреннего трения). Усилие черпания рассчитывается через давление на стенку ковша:

$$F = \frac{1}{2} \gamma \cdot H^2 \cdot K_a + c \cdot H \sqrt{K_a}, \quad (4)$$

где: γ – удельный вес грунта, H – глубина черпания, K_a – коэффициент активного давления.

Однако этот подход не учитывает:

- динамику процесса;
- влияние влажности на адгезию;
- геометрию ковша (угол щек, радиусы).

Поэтому он применим только для грубой оценки усилий, но не для прогноза налипания.

Метод дискретных элементов (МДЭ) (мезоуровень) рассматривает грунт как совокупность отдельных частиц, взаимодействующих через контактные законы (Герц – Миндлин, Джонсон – Кендолл – Робертс) [19, 20]. Для влагосодержащих грунтов вводятся капиллярные силы и вязкие связи между частицами.

Преимущества DEM:

- визуализация траекторий частиц;
- выявление мертвых зон;
- оценка распределения напряжений.

Недостатки:

- высокая вычислительная сложность;
- необходимость калибровки параметров (коэффициент восстановления, капиллярное давление);
- ошибка до 30–40% без экспериментальной валидации [21].

На микроуровне налипание описывается через поверхностную энергию и силы Ван-дер-Ваальса. Для влажных грунтов доминируют капиллярные мостики между частицами и поверхностью ковша [22].

Масса налипшего грунта может быть оценена как:

$$m_{stuck} \propto \gamma_{пов} \cdot A_{конт} \cdot (1 - e^{-kw}), \quad (5)$$

где: $\gamma_{пов}$ – поверхностное натяжение воды, $A_{конт}$ – площадь контакта, w – влажность.

Эти модели важны для понимания физики, но не масштабируются напрямую на промышленные ковши.

Ключевая проблема современного моделирования – разрыв между уровнями описания. Решение лежит в интеграции моделей.

Налипание влагосодержащих грунтов и пород зависит от ряда физических процессов смачивания [23] и требует учета просачивания и появления микромасштабных трещин в горной массе [24].

Для влагосодержащих грунтов применяется гибридная связка МДЭ и CFD (Computational Fluid Dynamics), где жидкость моделируется как континуум, а частицы – как дискретные объекты. Это позволяет учесть фильтрацию воды, образование

капиллярных мостиков и изменение реологии при динамическом нагружении [25].

Однако такие модели требуют суперкомпьютеров и остаются в области исследований.

Наиболее перспективным направлением является интеграция физических законов с данными. Используя результаты лабораторных или полевых испытаний, строятся эмпирико-аналитические зависимости, например:

$$k_z(w, \theta_{\text{щек}}, R) = k_0 \cdot (1 - \alpha \cdot e^{-\beta(w-20)^2}) \cdot f(\theta_{\text{щек}}, R), \quad (6)$$

где $f(\theta_{\text{щек}}, R)$ – функция геометрии, полученная из анализа больших данных.

Такие модели интерпретируемы, легко внедряются в CAD/CAE-системы и обеспечивают точность, достаточную для проектирования [26].

Конечная цель – создание цифрового двойника экскаватора, который в реальном времени:

- отслеживает положение ковша (по кинематике),
- оценивает состояние грунта (по данным с датчиков),
- прогнозирует налипание и корректирует траекторию.

Цифровые двойники позволяют смоделировать поведение объекта для прогнозирования его состояния через определенные промежутки времени [27].

Для этого требуется единая платформа, объединяющая:

- кинематическую модель (Денавит – Хартенберг);
- реологическую модель грунта (МДЭ или эмпирика);
- данные с IoT-датчиков (влажность, масса, температура).

Результаты исследования

Для повышения достоверности численных моделей взаимодействия ковша с влагосодержащими грунтами на базе филиала КузГТУ в г. Прокопьевске разработано специализированное электронное измерительное устройство, предназначенное для количественной оценки массы налипшего грунта в условиях, имитирующих реальный рабочий цикл экскаватора. Основная цель создания устройства – обеспечение экспериментальной базы для калибровки МДЭ-моделей и валидации эмпирико-аналитических зависимостей.

Архитектура устройства основана на трех ключевых компонентах: тензочувствительном элементе, прецизионном аналого-цифровом преобразователе (АЦП) и микроконтроллере с возможностью автономной записи данных. Тензодатчик обеспечивает регистрацию даже незначительных изменений массы, характерных для начальных этапов налипания. Сигнал с тензодатчика поступает на 24-битный АЦП НХ711, который благодаря высокому разрешению и встроенному программируемому усилителю позволяет достичь эффективного разрешения до 0,01 г при полной шкале.

Микроконтроллер ATmega328P выполняет роль центрального процессора системы. Он осуществляет

опрос АЦП с частотой до 10 Гц, выполняет программную фильтрацию сигнала (скользящее среднее по 25 отсчетам), производит расчет текущей массы налипания и управляет записью данных. Для обеспечения автономности система оснащена модулем microSD, что позволяет сохранять результаты испытаний непосредственно на съемный носитель в формате CSV без необходимости постоянно подключения к персональному компьютеру. Такой подход особенно ценен при проведении длительных серий испытаний или при работе в условиях, где доступ к ПК затруднен.

Особое внимание в разработке было уделено синхронизации измерений. Помимо массы, система одновременно регистрирует влажность грунта с помощью промышленного датчика с токовым выходом 4–20 мА и степенью защиты IP68. Этот датчик погружается непосредственно в грунтовый массив и обеспечивает непрерывный контроль влажности в диапазоне 0–100% с точностью $\pm 3\%$. Все данные – масса, влажность и временная метка – записываются в одну строку файла, что создает строго синхронизированный временной ряд. Эта особенность является фундаментальной для последующего анализа, поскольку позволяет установить прямую причинно-следственную связь между изменением влажности и динамикой налипания.

Методика проведения измерений строго стандартизирована. Перед началом каждой серии испытаний выполняется процедура тарировки: ковш устанавливается в исходное положение без нагрузки, и система фиксирует это состояние как нулевое. Затем ковш совершает заданное количество циклов «черпание → выгрузка», имитируя реальную работу экскаватора. После каждого цикла (или после заданного их количества) система автоматически фиксирует массу ковша с остатками налипшего грунта.

Устройство функционирует по следующему принципу: ковш, закрепленный на подвесе, соединен с тензочувствительным элементом, выход которого подключен к 24-битному аналого-цифровому преобразователю (АЦП). Сигнал с АЦП поступает на микроконтроллер, который выполняет:

- первичную фильтрацию данных (усреднение по 25 отсчетам);
- расчет текущей массы налипшего грунта;
- синхронизацию с показаниями датчика влажности (4–20 мА);
- запись результатов в цифровой файл (CSV) на съемный носитель.

Такой подход позволяет получать высокоточные ($\pm 1-2$ г), воспроизводимые и синхронизированные данные о динамике налипания в зависимости от числа циклов и влажности грунта. Эти данные являются критически важными для:

- настройки параметров МДЭ-модели (капиллярное давление, коэффициент адгезии);
- проверки гипотез о влиянии геометрии ковша на формирование мертвых зон;
- создания обучающих наборов для машинного обучения в задачах прогнозирования k_z .

Более того, предложенное устройство представляет собой физический компонент будущего цифрового двойника рабочего оборудования. В перспективе его можно интегрировать в систему IoT (систему, которая позволит объединить физические устройства – датчики, программное обеспечение, возможность подключения к интернету – в единую цифровую экосистему) на реальном экскаваторе, где оно будет:

- в реальном времени измерять прирост массы на ковше;
- передавать данные в бортовой компьютер;
- корректировать траекторию движения или рекомендовать режим очистки.

Таким образом, электронное измерительное устройство выступает не просто как лабораторный прибор, а как мост между физическим экспериментом и цифровой моделью, обеспечивая замкнутый цикл «измерение → калибровка → прогноз → управление». В перспективе аналогичная система может быть интегрирована непосредственно в конструкцию промышленного экскаватора. Датчики массы и влажности будут передавать данные в бортовой компьютер, который, используя заранее обученную модель, сможет в реальном времени прогнозировать снижение коэффициента наполнения и предлагать оператору или системе автоматического управления корректирующие действия – например, изменение траектории движения ковша или активацию режима самоочистки.

Обсуждение

Анализ полученных результатов позволяет сделать ряд важных выводов, имеющих как теоретическое, так и практическое значение для области горного машиностроения и автоматизации горных работ. Во-первых, подтверждается гипотеза о том, что главным барьером на пути к созданию достоверных цифровых двойников рабочего оборудования является не недостаток вычислительных мощностей или алгоритмов, а отсутствие надежных экспериментальных данных для их калибровки и валидации. Численные методы, такие как МДЭ, обладают огромным потенциалом для детального анализа микромеханики взаимодействия грунта с металлом, однако их прогностическая ценность напрямую зависит от точности входных параметров. Без экспериментальной базы эти модели рискуют превратиться в «черные ящики», дающие красивую визуализацию, но не отражающие реальную физику процесса. Предложенная в работе электронная измерительная система именно и призвана заполнить этот пробел, предоставив исследователям и инженерам инструмент для получения количественных данных высокой точности.

Во-вторых, необходимо подчеркнуть экономическую целесообразность данного подхода. Традиционные полноразмерные стендовые испытания новых конструкций ковшей требуют привлечения дорогостоящей техники, квалифицированного персонала и значительных временных затрат. Они часто проводятся уже на завершающем этапе проектирования, когда внесение изменений связано с большими финансовыми потерями. Внедрение же

лабораторной установки с электронной измерительной системой позволяет перенести основную часть исследований на ранние стадии НИОКР. Инженер может быстро и дешево (стоимость одного испытания составляет доли процента от полноразмерного) протестировать десятки вариантов геометрии ковша, отсеив заведомо неэффективные решения еще на этапе CAD-моделирования. Это полностью соответствует современной парадигме Model-Based Systems Engineering (MBSE), где виртуальные и физические прототипы находятся в постоянном взаимодействии, обеспечивая итеративный процесс оптимизации.

В-третьих, стоит обсудить роль полученных данных в контексте персонализации и адаптации. Горные предприятия работают в самых разных климатических и геологических условиях. Грунт в Кузбассе существенно отличается от грунта на Урале или в Якутии. Универсальная модель, работающая одинаково хорошо везде, маловероятна. Однако наличие базы данных, полученной с помощью нашей измерительной системы, позволяет создавать локально-адаптированные модели. Например, можно провести серию испытаний на грунте конкретного карьера и настроить МДЭ-модель именно под его характеристики. В дальнейшем эта кастомизированная модель может быть загружена в бортовую систему управления экскаватора, работающего на этом карьере, что обеспечит максимальную эффективность его работы.

Более того, собранный массив данных открывает прямой путь к применению методов машинного обучения (ML). Современные алгоритмы, такие как градиентный бустинг или нейронные сети, способны выявлять сложные, нелинейные зависимости в многомерных данных, которые трудно или невозможно описать аналитическими формулами. Используя наши синхронизированные данные (масса, влажность, число циклов, геометрия ковша), можно обучить ML-модель, которая будет с высокой точностью прогнозировать коэффициент наполнения для любого нового, ранее не тестировавшегося ковша. Такая модель станет мощным инструментом для инженеров-конструкторов, позволяя им практически мгновенно оценивать эффективность своих решений.

Наконец, нельзя не упомянуть о стратегическом значении данной работы для развития концепции умных горных машин. Будущее горной промышленности – за автономными и полуавтономными системами, способными принимать решения без участия человека. Однако для того, чтобы такая система могла «думать», ей необходима точная и актуальная информация о своем состоянии и окружающей среде. Разработанное электронное измерительное устройство является важным шагом на этом пути. Оно демонстрирует, как с помощью относительно простых и недорогих сенсоров можно получить важную информацию о процессе, который напрямую влияет на производительность машины. Интеграция подобных сенсоров в IoT-платформу горного предприятия позволит не только оптимизировать работу отдельного экскаватора,

но и осуществлять прогнозирующую аналитику на уровне всего парка техники, планируя техническое обслуживание, логистику и графики работ с беспрецедентной точностью.

Таким образом, представленное исследование выходит далеко за рамки простого описания измерительного прибора. Оно предлагает новую методологию, основанную на тесной интеграции физического эксперимента, численного моделирования и анализа данных. Эта методология позволяет преодолеть фундаментальное противоречие между точностью и практичностью, обеспечивая инженерам инструмент, который одновременно является и научно строгим, и экономически выгодным. Внедрение подобных подходов на практике неизбежно приведет к созданию нового поколения энергоэффективного, адаптивного и интеллектуального горного оборудования, способного уверенно работать в самых сложных условиях.

Выводы

Анализ современных подходов к моделированию черпания влагосодержащих грунтов показывает, что ни один изолированный метод не обеспечивает достаточной достоверности. Классические теории слишком упрощены, МДЭ-модели требуют калибровки, а микрофизические модели не масштабируемы.

Перспективным направлением является интеграция разнородных моделей на базе единой кинематической основы (метод Денавита – Хартенберга). Такой подход позволяет:

- использовать МДЭ для калибровки макропараметров, применять эмпирико-аналитические зависимости для быстрого расчета;
- встраивать модели в системы цифрового двойника.

Развитие предлагаемой парадигмы позволит создавать адаптивные системы управления экскаваторами, способные автоматически компенсировать влияние налипания и поддерживать высокий коэффициент наполнения даже в сложных горнотехнических условиях.

В работе особое внимание уделено разработке электронного измерительного устройства, обеспечивающего количественную оценку массы налипшего грунта с высокой точностью и воспроизводимостью. Это устройство играет роль ключевого элемента калибровки для МДЭ-моделей и служит физическим ядром цифрового двойника рабочего оборудования.

Результаты исследования показывают, что предложенный комплексный подход позволяет:

- значительно повысить точность прогноза коэффициента наполнения ковша экскаватора;
- повысить эффективность проектирования новых ковшей;
- заложить основу для создания интеллектуальных систем управления экскаваторами, способных автоматически учитывать влияние налипания на объем экскавации и при достижении критического уровня выдавать машинисту рекомендацию об очистке.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением функционала измерительного устройства (добавление датчиков температуры, вибрации), его интеграцией в промышленные IoT-платформы и с использованием полученных данных для обучения нейросетевых моделей прогнозирования производительности карьерных выемочных машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клишин В. И., Герике Б. Л., Кузин Е. Г., Мокрушев А. А. Интеллектуальное обслуживание редукторов горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № S38. С. 369–392. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-38-369-392. EDN YSHNXN.
2. Kuzin E. G., Gerike B. L., Mamaeva M. S., Singh K. Diagnostics of Gearboxes of Mining Belt Conveyors Using Floating Spectral Masks // E3S Web of Conferences: IVth International Innovative Mining Symposium, Kemerovo, 14–16 октября 2019 года. EDP Sciences : EDP Sciences, 2019. P. 03011. DOI: 10.1051/e3sconf/201910503011. EDN YQFIFS.
3. Kuzin E., Shahmanov V., Dubinkin D. Technical Diagnostics of Ventilation Units for Energy Efficiency and Safety of Operation // 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/20172103006. EDN ZRRYBP.
4. Кузин Е. Г. Оценка технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров методами неразрушающего контроля: специальность 05.05.06 «Горные машины»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кузин Евгений Геннадьевич. Кемерово, 2020. 141 с. EDN LOCCJI.
5. Мамаева М. С., Горюнов С. В., Хорешок А. А. Влияние свойств влагосодержащих грунтов на усилия сопротивления копания ковшом экскаватора тип «Обратная лопата» // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 2(172). С. 51–58. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-51-58. EDN NIXCZM.
6. Мамаева М. С., Кузин Е. Г., Горюнов С. В., Хорешок А. А. Аналитический обзор моделей дискретно-элементного моделирования процессов загрузки-разгрузки ковша гидравлического экскаватора // Техника и технология горного дела. 2025. № 3(30). С. 57–75. DOI: 10.26730/2618-7434-2025-3-57-75. EDN IDVPUW.
7. Гурко А. Г. Математическая модель манипулятора экскаватора с обратной лопатой // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2011. № 55. С. 79–89. EDN OZDWMX.
8. Комиссаров А. П., Лагунова Ю. А., Набиуллин Р. Ш., Хорошавин С. А. Цифровая модель процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием карьерного экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 4. С. 156–168.

DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_156.
EDN VLPOYX.

9. Мамаева М. С., Горюнов С. В., Хорешок А. А. Моделирование процессов налипания и намерзания горной массы на рабочее оборудование экскаваторов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : Сборник трудов XXI Международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горно-промышленной декады, Екатеринбург, 06–07 апреля 2023 года. Под общей редакцией Лагуновой Ю. А. Оргкомитет: Лагунова Ю. А., Калянов А. Е. Екатеринбург : Уральский государственный горный университет, 2023. С. 69–75. EDN IOJKBA.

10. Губанов С. Г., Веревошкин Н. Г., Богданова Е. С. Имитационное моделирование процесса копания гидравлического экскаватора // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XXII международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 04–05 апреля 2024 года. Екатеринбург : Уральский государственный горный университет, 2024. С. 43–46. EDN CLHPQN.

11. Телиман И. В. Обоснование рациональных конструктивных и режимных параметров исполнительных механизмов рабочего оборудования гидравлического экскаватора: специальность 05.05.06 «Горные машины»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Телиман Ирина Викторовна. 2022. 122 с. EDN TKMZNZ.

12. Хорошавин С. А. Повышение эффективности карьерных одноковшовых экскаваторов за счет совершенствования рабочего оборудования: специальность 05.05.06 «Горные машины»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Хорошавин Сергей Александрович. 2015. 155 с. EDN YZZOTF.

13. Комиссаров А. П., Хорошавин С. А., Телиман И. В. Имитационная модель функционирования гидравлического экскаватора // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сборник трудов XVII Международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 04–05 апреля 2019 года. Под общей редакцией Лагуновой Ю. А. Екатеринбург : Уральский государственный горный университет, 2019. С. 264–266. EDN XZTHZL.

14. Гурко А. Г., Колобова И. А. Моделирование кинематики экскаватора в matlab robotics toolbox // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2013. № 60. С. 059–065. EDN RUEMWT.

15. Корнеев А. А., Павлов В. П. Анализ кинематических параметров экскаватора при планировочных работах // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XV Международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 20–21 апреля 2017 года. Екатеринбург : Уральский государственный горный университет, 2017. С. 58–61. EDN YSAUST.

16. Васьков В. С. Теоретические основы построения уточненной математической модели процесса экскавации // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–1. С. 156. EDN VIDVGZ.

17. Мохаммад Ж. Разработка методики оптимизации конструкции элементов рабочего оборудования гидравлических экскаваторов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мохаммад Жалаль. 2024. 180 с. EDN DTFTHW.

18. Комиссаров А. П., Лагунова Ю. А., Плотников Н. С. [и др.] Взаимодействие главных механизмов карьерного экскаватора при экскавации горных пород // Известия Уральского государственного горного университета. 2018. № 4(52). С. 93–97. DOI: 10.21440/2307-2091-2018-4-93-97. EDN VQUDTU.

19. Комиссаров А. П., Лагунова Ю. А., Лукашук О. А., Шестаков В. С. Программное управление процессом экскавации горных пород карьерным экскаватором // Горное оборудование и электромеханика. 2020. № 5(151). С. 28–33. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-5-28-33. EDN AVCKBH.

20. Frimpong S., HuY., Chang Z. Performancesimulation of shovel excavators for earthmoving operations // In Summer in computer simulation conference (SCSC/03). 2003. Pp. 133–138.

21. Geu Flores F., Kecskemethy A., Pottker A. Workspace analysis and maximal force calculation of a face-shovel excavator using kinematical transformers. 12thIFToMMWorldCongress, Besancon. June 18–21. 2007. 6 pp.

22. Подэрни Р. Ю. Механическое оборудование карьеров. 6-е изд., перераб. и доп. М. : Изд. МГГУ, 2007. 680 с.

23. Khairi M., Erdélyi, Z., Baumli P. Wettability of Polar and Apolar Liquids on Metal Surfaces // *Metals*. 2025. № 15. Art. 23. DOI: 10.3390/met15010023.

24. Ning K., Li Z.-Q. Failure Mechanism of Steep Rock Slope Under the Mining Activities and Rainfall: A Case Study // *Water*. 2026. № 18 (1). Art. 56. DOI: 10.3390/w18010056.

25. Лагунова Ю. А., Комиссаров А. П., Шестаков В. С. [и др.]. Горные машины: энциклопедия. М. : Машиностроение, 2011. Т. IV–24. 493 с.

26. Кравченко А. Л., Гончарко А. А., Кравченко А. Л., Дробышевская О. В. Мультидисциплинарная модель экскаватора // Автотракторостроение и автомобильный транспорт : Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. В 2-х т. Т. 1. Минск : Белорусский национальный технический университет, 2022. С. 214–219. EDN NTYAJB.

27. Iliuță M.-E., Moisescu M.-A., Pop E., Ionita A.-D., Caramihai S.-I., Mitulescu T.-C. Digital Twin – A Review of the Evolution from Concept to Technology and Its Analytical Perspectives on Applications in Various Fields // *Applied Sciences*. 2024. № 14(13). Art. 5454. DOI: 10.3390/app14135454.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Мамаева Мария Сергеевна, старший преподаватель, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевске (653033, Россия, Кемеровская обл., г. Прокопьевск, ул. Ноградская, 19а),

Хорешок Алексей Алексеевич, профессор, доктор техн. наук, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28),

Удалова Юлия Сергеевна, студент, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевске (653033, Россия, Кемеровская обл., г. Прокопьевск, ул. Ноградская, 19а).

Заявленный вклад авторов:

Мамаева Мария Сергеевна – обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, выводы, написание текста.

Хорешок Алексей Алексеевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент.

Удалова Юлия Сергеевна – сбор и анализ данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-2-66-76

Mariya S. Mamaeva¹, Alexey A. Khoreshok², Julia S. Udalova¹

¹ T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, branch in Prokopyevsk

² T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: cliomineng06@gmail.com

JUSTIFICATION OF COMBINED DIGITAL MODELS OF THE EXCAVATION PROCESS WET LOAM



Article info

Received:

15 January 2026

Accepted for publication:

15 March 2026

Accepted:

15 April 2026

Published:

04 June 2026

Keywords: reverse shovel, moisture-containing soils, adhesion, filling coefficient, kinematics, DEM, numerical modeling, model integration, powdery loam

Abstract.

The article presents a systematic review of modern approaches to modeling the process of scooping moisture-containing soils (dusty loams with a humidity of 18-22%) with a hydraulic excavator of the "reverse shovel" type. Methods of kinematic analysis of working equipment based on the Denavit – Hartenberg formalism are considered, as well as key areas of mathematical modeling of bucket–ground interaction: from classical theories of marginal equilibrium to modern numerical methods - the discrete element method (DDE/DEM) and the finite element method (FEM). Special attention is paid to the problem of integrating heterogeneous models — analytical, numerical and physical — to increase the reliability of the forecast of sticking and the bucket filling coefficient. It is demonstrated that isolated approaches have significant limitations: classical theories do not take into account the dynamics of the process and adhesion, and numerical models require careful calibration based on experimental data. The paper describes the development of a specialized electronic measuring device for quantifying the mass of adhering soil with an accuracy of $\pm 1-2$ g, providing synchronized recording of humidity and adhesion dynamics in real time. It is shown that an integrated approach combining kinematics, soil rheology, bucket geometry and experimental validation can overcome the limitations of isolated methods. The concept of a digital twin of working equipment is proposed, integrating a kinematic model, rheological parameters of the soil and data from sensors to predict the performance of mining excavation machines in difficult mining conditions, where losses due to sticking reach 15-25%. The results of the study provide a methodological basis for the development of adaptive control systems capable of automati-

For citation: Mamaeva M.S., Khoreshok A.A., Udalova J.S. Justification of combined digital models of the excavation process wet loam. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2026; 2(184):66-76 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2026-2-66-76, EDN: LIOWMB

REFERENCES

1. Klishin V.I., Gerike B.L., Kuzin E.G., Mokrushev A.A. Intelligent maintenance of gearboxes of mining machines. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; S38:369–392. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-38-369-392. EDN YSHNXN.
2. Kuzin E.G., Gerike B.L., Mamaeva M.S., Singh K. Diagnostics of Gearboxes of Mining Belt Conveyors Using Floating Spectral Masks. *E3S Web of Conferences: IVth International Innovative Mining Symposium*. Kemerovo, October 14-16, 2019. EDP Sciences: EDP Sciences; 2019. P. 03011. DOI: 10.1051/e3sconf/201910503011. EDN YQFIFS.
3. Kuzin E., Shahmanov V., Dubinkin D. Technical Diagnostics of Ventilation Units for Energy Efficiency and Safety of Operation. *E3S Web of Conferences: The Second International Innovative Mining Symposium*. Kemerovo, November 20–22, 2017. Vol. 21. Kemerovo: EDP Sciences; 2017. DOI: 10.1051/e3sconf/20172103006. EDN ZRRYBP.
4. Kuzin E.G. Assessment of the technical condition of gearboxes of mine belt conveyors using non-destructive testing methods: specialty 05.05.06 "Mining machines": dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Kuzin Evgeny Gennadievich. Kemerovo, 2020. 141 p. EDN LOCCJI.
5. Mamaeva M.S., Goryunov S.V., Khoreshok A.A. Influence of the properties of moisture-containing soils on the digging resistance forces of a backhoe excavator bucket. *Mining equipment and electromechanics*. 2024; 2(172):51–58. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-51-58. EDN NIXCZM.
6. Mamaeva M.S., Kuzin E.G., Goryunov S.V., Khoreshok A.A. Analytical review of discrete element modeling of hydraulic excavator bucket loading and unloading processes. *Mining Engineering and Technology*. 2025; 3(30):57–75. DOI: 10.26730/2618-7434-2025-3-57-75. EDN IDVPUW.
7. Gurko A.G. Mathematical model of a backhoe excavator manipulator. *Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Highway University*. 2011; 55:79–89. EDN OZDWMX.
8. Komissarov A.P., Lagunova Yu.A., Nabiullin R.Sh., Khoroshavin S.A. Digital model of the process of excavation of rocks by the working equipment of a quarry excavator. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2022; 4:156–168. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_156. EDN BLPOYX.
9. Mamaeva M.S., Goryunov S.V., Khoreshok A.A. Modeling of the processes of sticking and freezing of rock mass on the working equipment of excavators. *Technological equipment for the mining and oil and gas industry: Collection of papers of the XXI International scientific and technical conference held within the framework of the Ural Mining Decade*. Yekaterinburg, April 6–7, 2023. General editor Lagunova Yu.A. Organizing committee: Lagunova Yu.A., Kalyanov A.E. Yekaterinburg: Ural State Mining University; 2023. Pp. 69–75. EDN IOJKBA.
10. Gubanov S.G., Verevchkin N.G., Bogdanova E.S. Simulation modeling of the digging process of a hydraulic excavator. *Technological equipment for the mining and oil and gas industry: collection of works of the XXII international scientific and technical conference*. Ekaterinburg, April 4–5, 2024. Ekaterinburg: Ural State Mining University; 2024. Pp. 43–46. EDN CLHPQN.
11. Teliman I.V. Justification of rational design and operating parameters of actuators of the working equipment of a hydraulic excavator: specialty 05.05.06 "Mining machines": dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Teliman Irina Viktorovna. 2022. 122 p. EDN TKMZNF.
12. Khoroshavin S.A. Increasing the efficiency of quarry single-bucket excavators by improving the working equipment: specialty 05.05.06 "Mining machines": dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Khoroshavin Sergey Alexandrovich. 2015. 155 p. EDN YZZOTF.
13. Komissarov A.P., Khoroshavin S.A., Teliman I.V. Simulation model of the functioning of a hydraulic excavator. *Technological equipment for the mining and oil and gas industry: Collection of works of the XVII International scientific and technical conference*. Ekaterinburg, April 4-5, 2019. General editor Lagunova Yu.A. Ekaterinburg: Ural State Mining University; 2019. Pp. 264–266. EDN XZTHZL.
14. Gurko A.G., Kolobova I.A. Modeling of excavator kinematics in matlab robotics toolbox. *Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Highway University*. 2013; 60:059–065. EDN RUEMWT.
15. Korneev A.A., Pavlov V.P. Analysis of the kinematic parameters of an excavator during planning operations. *Technological equipment for the mining and oil and gas industry: collection of works of the XV International scientific and technical conference*. Ekaterinburg, April 20–21, 2017. Ekaterinburg: Ural State Mining University; 2017. Pp. 58–61. EDN YSAUST.
16. Vas'kov V.S. Theoretical foundations for constructing a refined mathematical model of the excavation process. *Modern problems of science and education*. 2015; 1–1:156. EDN VIDVGZ.
17. Mohammad J. Development of a methodology for optimizing the design of elements of the working equipment of hydraulic excavators: dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Mohammad Jalal. 2024. 180 p. EDN DTFTHW.

18. Komissarov A.P., Lagunova Yu.A., Plotnikov N.S. [et al.] Interaction of the main mechanisms of a quarry excavator during excavation of rocks. *Bulletin of the Ural State Mining University*. 2018; 4 (52):93–97. DOI: 10.21440/2307-2091-2018-4-93-97. EDN VQUDTU.

19. Komissarov A.P., Lagunova Yu.A., Lukashuk O.A., Shestakov V.S. Software control of the process of excavation of rocks by a quarry excavator. *Mining equipment and electromechanics*. 2020; 5(151):28–33. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-5-28-33. EDN AVCKBH.

20. Frimpong S., Hu Y., Chang Z. Performance simulation of shovel excavators for earthmoving operations. In *Summer in computer simulation conference (SCSC/03)*. 2003. Pp. 133–138.

21. Geu Flores F., Kecskemethy A., Pottker A. Workspace analysis and maximum force calculation of a face-shovel excavator using kinematic transformers. *12th International Mining and Metallurgical Conference*. Besancon, June 18–21, 2007. 6 pp.

22. Poderny R.Yu. Mechanical equipment of quarries. 6th ed., revised and enlarged. Moscow: Moscow State Mining University; 2007. 680 p.

23. Khairi M., Erdélyi Z., Baumli P. Wettability of polar and apolar liquids on metal surfaces. *Metals*. 2025; 15:23. DOI: 10.3390/met15010023.

24. Ning K., Li Z.-Q. Failure Mechanism of Steep Rock Slope Under the Mining Activities and Rainfall: A Case Study. *Water*. 2026; 18(1):56. DOI: 10.3390/w18010056.

25. Lagunova Yu.A., Komissarov A.P., Shestakov V.S. [et al.]. Mining machines: encyclopedia. Moscow: Mashinostroenie; 2011. Vol. IV-24. 493 p.

26. Kravchenko A.L., Goncharko A.A., Kravchenko A.L., Drobysheskaya O.V. Multidisciplinary model of an excavator. *Automotive and tractor manufacturing and automobile transport: Collection of scientific papers of the International scientific and practical conference*. In 2 volumes. Vol. 1. Minsk: Belarusian National Technical University; 2022. Pp. 214–219. EDN NTYAJB.

27. Iliuță M.-E., Moiescu M.-A., Pop E., Ionita A.-D., Caramihai S.-I., Mitulescu T.-C. Digital Twin – A Review of the Evolution from Concept to Technology and Its Analytical Perspectives on Applications in Various Fields. *Applied Sciences*. 2024; 14(13):5454. DOI: 10.3390/app14135454.

© 2026 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Mariya S. Mamaeva, senior lecturer, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, branch in Prokopyevsk (653039, Russia, Prokopyevsk, Nogradskaya str., 19a), e-mail: art@mmamaeva.ru

Alexey A. Khoreshok, Dr. Sc. (Engineering), Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennyyaya str., 28)

Julia. S. Udalova, student, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, branch in Prokopyevsk (653039, Russia, Prokopyevsk, Nogradskaya str., 19a)

Contribution of the authors:

Mariya S. Mamaeva – review of relevant literature, conceptualization of research, conclusions, writing the text.

Alexey A. Khoreshok – setting a research task, scientific management

Julia. S. Udalova – data collection and analysis.

Authors have read and approved the final manuscript.

