



УДК 622.02.112

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МОДЕЛЕЙ ДИСКРЕТНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЗАГРУЗКИ-РАЗГРУЗКИ КОВША ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА

Мамаева М.С.<sup>1</sup>, Кузин Е.Г.<sup>1</sup>, Хорешок А.А.<sup>2</sup>, Горюнов С.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевске

<sup>2</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева



### Информация о статье

Поступила:

5 августа 2025 г.

Рецензирование:

18 сентября 2025 г.

Принята к печати:

22 сентября 2025 г.

### Ключевые слова:

налипание пород, пылеватые суглинки, ковш экскаватора, гидравлический экскаватор, дискретно-элементное моделирование, модели для численного моделирования

### Аннотация.

Проведен обзор научных публикаций, посвященных проблемам налипания горной массы на элементы горных машин. При эксплуатации автомобильно-экскаваторных комплексов или вскрышие пород на борт драглайнами из-за налипания происходит уменьшение полезного объема ковша до 15-20%. Для того, чтобы предотвратить чрезмерное налипание пород на ковш, следует исследовать процессы движения частиц, происходящие при загрузке и разгрузке ковша. При определении липкости пылеватых суглинков при работе с влажосодержащими породами довольно сложно вычислить траектории движения частиц грунта. На каждую из частиц будут действовать разные силы, и каждая из частиц будет иметь набор констант, что делает моделирование данного процесса практически невозможным. Применение метода дискретно-элементного моделирования позволяет представить моделируемый материал в виде совокупности отдельных частиц, являющихся твердыми телами. В данной статье рассматривается процесс загрузки-разгрузки ковша экскаватора типа обратная лопата с помощью метода дискретных элементов. Выполнен аналитический обзор разработанных моделей, используемых в дискретно-элементном моделировании, показаны их преимущества для различных типов пород. Приведены характерные параметры дискретно-элементного моделирования процесса движения грунта в ковше экскаватора, позволяющие приблизить расчеты, выполненные моделированием, к реальному поведению материала. Понимание процесса взаимодействия частиц породы с элементами стенок ковша позволяет обосновывать пространственно-геометрические параметры стенок, уменьшающие эффект налипания на них увлажненных глинистых пород.

**Для цитирования:** Мамаева М.С., Кузин Е.Г., Хорешок А.А., Горюнов С.В. 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

### Введение

Эффективность разработки полезных ископаемых открытым способом во многом зависит от надежности и безопасности работы горных машин и карьерного оборудования. Современные исследования ученых направлены на решение актуальных проблем повышения долговечности, безопасности и эффективности эксплуатации карьерной техники. Так, работы Андреевой Л.И. [1-3] посвящены исследованиям эксплуатационной надежности и формированию методологии технического сервиса на основе рациональных стратегий обслуживания горных и транспортных машин.



Долговечность горных машин обеспечивается учетом множества влияющих факторов. Так, в работе [4] авторами разработана методика определения скоростей подъема и напора по всем траекториям копания электрического карьерного экскаватора. В работе [5] показано, что внешние нагрузки, действующие на рабочее оборудование карьерного экскаватора, изменяются во времени циклично и зависят от ряда факторов, что требует учета этих факторов при проектировании.

Исследования авторов направлены на снижение вибраций в системах горных машин [6] и обеспечения рациональной мощности силовой установки [7].

Анализ представленных и других работ показывает актуальность цифрового моделирования при рассмотрении большинства процессов, возникающих при эксплуатации карьерного оборудования. В настоящей работе рассмотрим основы для моделирования процессов зачерпывания и разгрузки ковша гидравлического экскаватора для их совершенствования. Преимущества моделирования позволяют с высокой точностью провести детальный анализ процесса, значительно сократить время и материальные ресурсы при разработке модели. Однако имеются некоторые сложности и ограничения в воспроизведении реальных условий эксплуатации.

Основной проблемой, возникающей при моделировании, является поведение грунта при его разрушении зубьями ковша. Грунт неоднороден по размеру частиц, и для моделирования нужно использовать довольно широкий диапазон размеров частиц. При проведении экскавационных работ гидравлическими экскаваторами, особенно при проведении вскрышных работ, учитывается гранулометрический состав грунта. В средней полосе России распространен легкий пылеватый суглинок, который относится к глинистым грунтам, в котором содержание песчаных частиц менее 40% [8]. Число пластичности ( $I_p$ ) легкого пылеватого суглинка находится в пределах  $0,07 < I_p \leq 0,12$ . Таким образом, около 60% пылеватого суглинка – это глинистые частицы, имеющие микроскелетную основу. В работе Соколова В.Н. [8], для изучения микроструктуры частиц грунта использовался растровый электронный микроскоп – РЭМ (raster scanning electronic microscope, RSEM). Анализ микрофотографий образца суглинка (см. рис. 1) показал, что скелет формируют разрушенные минералы: полевой шпат, базальт, кварц. Глинистый же материал (пылеватые фракции) обволакивают первичные скелетообразующие минералы в виде сплошных или неравномерно распределенных оболочек (рубашек) [8].

Структура глинистых вскрышных пород, представленная на рисунке 1, объясняет низкую динамическую устойчивость при наличии слабых коагуляционных контактов. При незначительном внешнем воздействии, например вибрации, увлажнения и прочих факторов слабые связи разрушаются по каолининовым оболочкам.

Проблемные процессы и явления, происходящие при экскавации горных пород, включают в себя: неравномерность и ударность приложения нагрузки к элементам ковша и рукояти; налипание и намерзание пород на поверхности ковша; различное поведение пород в зависимости от их физико-химических свойств и гранулометрического состава.

Так, например, при копании мягких и сыпучих пород усилие остается стабильным, процесс зачерпывания протекает без рывков. Для полускальных, выветренных пород наблюдается откалывание отдельных кусков по ослабленным поверхностям, при этом нагрузка изменяется скачкообразно. Для крепких скальных пород экскавация осуществляется только после их предварительного рыхления взрывом. В таком случае процесс существенно зависит от качества проработки пород взрывом, а именно от крупности кусков. В случае с крупно-взорванными породами вначале ковш работает в упорном режиме, потом происходит отрыв, и нагрузка резко снижается, что приводит к колебаниям рабочих элементов. В условиях разработки угольных месторождений встречаются участки, на которых крепкие скальные породы находятся в составе глинистых. Добавим к этому зависимости процессов наполнения ковша от двух наиболее важных факторов: влажности и температуры окружающей среды.

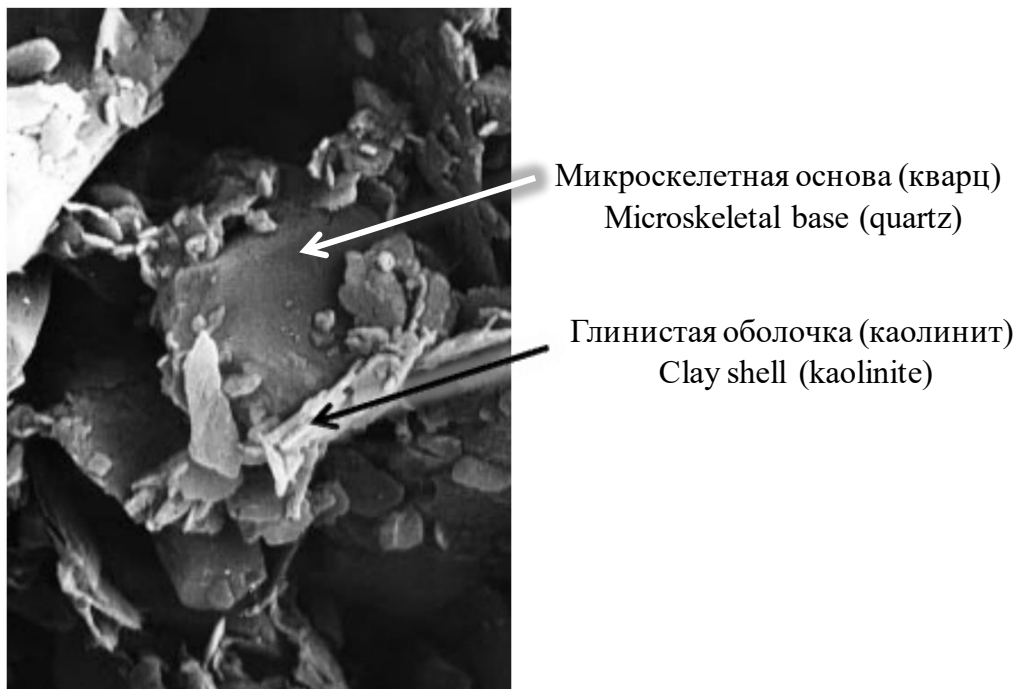


Рисунок 1 – РЭМ-фотография образца суглинка (увеличение 1500х)  
Figure 1 – RSEM photograph of a loam sample (magnification 1500x)

Основным направлением наших исследований являются процессы налипания мягких пород на конструктивные элементы ковша и способы минимизации данного явления. Негативные последствия налипания приводят к уменьшению полезной вместимости ковша, увеличению сопротивления копания, вызванного внедрением ковша в глинистые породы, увеличению затрачиваемой энергии на возврат более тяжелого пустого ковша, а также простой, связанные с остановкой работ для периодической очистки ковша. При температуре, близкой к нулю, происходит фазовый переход, свойства пород изменяются, а процесс налипания превращается в намерзание.

При определенном сочетании количества глинистых фракций и воды наблюдаются тиксотропные явления, вызванные разупрочнением структурных связей при механическом воздействии, а при его прекращении – последующим восстановлению и упрочнению. При длительном нахождении налипшей горной массы в ковше (порядка 20-30 минут) нередко наблюдаются процессы консистентной блокировки (цементации), при которой породы превращаются в трудноотделимую монолитную массу.

Механизмы развития цементации представляют схватывание (быстрое затвердевание), окаменение (уплотнение и кристаллизация) и агломерацию (слипание в крупные комки).

Таким образом, для обоснования рациональных параметров современных цифровых моделей следует провести полноценный анализ методов, опыт их применения для заявленного направления исследования.

В данном исследовании моделирование частиц пылеватого суглинка предлагается проводить методом дискретных элементов, для приближения к реально движущимся частицам вскрышных пород по элементам ковша. При этом необходимо рассмотреть и смоделировать несколько видов частиц, часть из которых будет иметь вид многогранников, а другая будет иметь сферическую форму.



### Методы исследования

Для исследования поведения большого количества разнообразных частиц горных пород рассмотрим варианты метода дискретных элементов (МДЭ, англ. DEM). Метод представляет собой численную модель, позволяющую описывать механическое поведение ансамблей из сферических и плоских дисковых тел. Существуют разновидности метода, включающие ряд моделей: линейная контактная модель, описанная в работе Р. Cundall [9], контактная модель Герца, использованная в работе И. Гайнулина [10], демпфированные упруго-гистерезисные модели Филке [11] и различные их сочетания, адаптированные для целей расчета.

Отдельно следует отметить описанную в работе Н. Высотина гистеронную модель пространства Прейсаха-Майергойца, описывающую поведение структурно-неоднородных сред с дискретной памятью [12].

Поведение частиц в моделях дискретных элементов определяется координатами центра ее тяжести ( $x_i$ ) и углом поворота ( $\theta_i$ ) вокруг центра тяжести отдельных упругих частиц сферической формы радиусом  $R_i$ . Уравнения движения каждой частицы интегрируются по времени [10]. Для этого процесса необходимо знать общую силу действующих частиц. Общая сила – это равнодействующая контактных сил (между частицами и на границе раздела) и физических сил. Типичными физическими воздействиями являются сила тяжести (вес), давление жидкости и другие силы, такие как электростатические, электромагнитные и т. д. Для определения скорости частиц грунта чаще всего используют схему первого порядка Эйлера, а для определения перемещения – модифицированную схему первого порядка.

Рассмотрим математический аппарат DEM моделирования при использовании сферических тел и тел некруглой формы. Учитываются силы, действующие по нормали и по касательной к плоскости контакта. Плоскость контакта перпендикулярна линии, соединяющей центры двух сфер или ближайшие точки частиц с границей раздела. Важное условие работы модели – сила должна быть отталкивающей. При этом должна обеспечиваться диссипация энергии нормальной составляющей силы.

**Линейная упруго-гистерезисная модель (ЛУГМ).** ЛУГМ не использует условия демпфирования и поэтому не зависит от относительных скоростей соседних (не контактирующих) частиц. Данная модель адекватно описывает сжимаемые породы следующей системой уравнений:

$$F_n^t = \begin{cases} \min(K_{nl}s_n^t, F_n^{t-\Delta t} + K_{nu}\Delta s_n), & \text{if } \Delta s_n \geq 0 \\ \max(F_n^{t-\Delta t} + K_{nu}\Delta s_n, \lambda K_{nl}s_n^t), & \text{if } \Delta s_n < 0 \end{cases} \quad (1)$$
$$\Delta s_n = s_n^t - s_n^{t-\Delta t},$$

где  $F_n^t$  и  $F_n^{t-\Delta t}$  – нормальные силы упругопластического контакта в текущий момент времени  $t$  и в предыдущий  $t-\Delta t$ , где  $\Delta t$  – временной интервал;  $\Delta s_n$  – изменение нормального перекрытия контакта в течение текущего времени;  $s_n^t$  и  $s_n^{t-\Delta t}$  – значения нормального перекрытия в текущий и предыдущий моменты времени соответственно;  $K_{nl}$  и  $K_{nu}$  – значение жесткости контакта при загрузке и разгрузке соответственно;  $\lambda$  – является дополнительной безразмерной малой константой  $\lambda \approx 0,001$ , описывающей возврат нормального усилия в ноль, если перекрытие частиц станет равным нулю [13].

Графическая интерпретация ЛУГМ приведена на рис. 2, площадь треугольника ABC характеризует рассеянную энергию после столкновения частиц [13].

В процессе погрузки ковша частицы упруго сжимаются, и нормальная сила линейно возрастает на участке А – В. В процессе разгрузки остаточная деформация исчезает, и усилие резко падает по линии В – С.

Упругое поведение частиц характеризуется жесткостью, зависящей от их размера, объемного модуля Юнга и коэффициента восстановления –  $\varepsilon$ , являющегося мерой рассеяния энергии. Для контакта двух частиц или частицы с границей раздела эквивалентные значения жесткости при погрузке определяются [14]:

$$\frac{1}{K_{nl}} = \begin{cases} \frac{1}{K_{nl,\rho_1}} + \frac{1}{K_{nl,\rho_2}} & \text{для контакта частица – частица} \\ \frac{1}{K_{nl,\rho}} + \frac{1}{K_{nl,b}} & \text{для контакта частиц с границей раздела} \end{cases} \quad (2)$$

$$K_{nu} = \frac{K_{nl}}{\varepsilon^2}$$

где двум контактирующим частицам присвоены индексы 1 и 2.

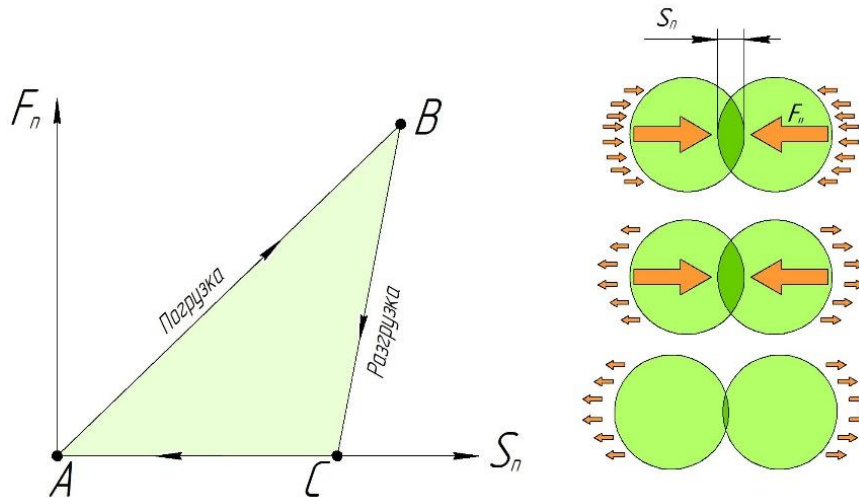


Рисунок 2 – Графическая интерпретация ЛУТМ  
Figure 2 – Graphical interpretation Linear Elastic-Hysteresis Model

Значения жесткости, связанные с частицей и границей раздела, рассчитываются соответственно как [14]:

$$\begin{aligned} K_{nl,\rho} &= E_\rho L \\ K_{nl,b} &= E_b L \end{aligned} \quad (3)$$

где  $E_\rho$  представляет собой объемный модуль Юнга или модуль упругости частиц материала;  $E_b$  – модуль Юнга материала на границе раздела;  $L$  – размер частиц.

**Линейная упруго-точечная модель (ЛУТМ).** ЛУТМ широко используется в ДЭМ, главным образом из-за ее простоты, тела представлены точками и не надо учитывать их размер. В этой модели предполагается, что силы взаимодействия между частицами линейно зависят от их относительного перемещения. Нормальная сила в этой модели включает упругую силу отталкивания и демпфирующую силу [14]:

$$F_n = K_{nl} s_n + C_n \frac{ds_n}{dt} \quad (4)$$

где  $K_{nl}$  – нормальная контактная жесткость, определенная ранее для ЛУТМ модели в уравнении (3);  $s_n$  – расстояние перекрытия контакта по нормали (как на рис. 2);  $C_n$  – коэффициент демпфирования;  $\frac{ds_n}{dt}$  – производная от расстояния перекрытия по времени.

Рассеяние энергии в линейной модели упругого типа является вязким по своей природе и моделируется в уравнении (4) введением демпфирующей силы.

Значение нормального коэффициента демпфирования  $C_n$  определяется следующим образом [14]:

$$C_n = 2\eta \sqrt{m \cdot K_{nl}} \quad (5)$$

где:  $\eta$  – безразмерный параметр демпфирования, зависящий от коэффициента восстановления  $\varepsilon$ ;  $m$  – эквивалентная масса контакта:



$$\frac{1}{m} = \begin{cases} \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \text{ для контакта двух частиц} \\ \frac{1}{m_n} \text{ для контакта частицы с границей раздела} \end{cases} \quad (6)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – массы соприкасающихся частиц, тогда как  $m_n$  – масса частицы, соприкасающейся с границей раздела.

Функциональная зависимость между коэффициентом демпфирования и коэффициентом восстановления:

$$\varepsilon = \begin{cases} \exp \left[ -\frac{\eta}{\sqrt{1-\eta^2}} \left( \pi - \arctan \frac{2\eta\sqrt{1-\eta^2}}{1-2\eta^2} \right) \right] \text{ if } 0 \leq \eta < \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \exp \left[ -\frac{\eta}{\sqrt{1-\eta^2}} \arctan \frac{2\eta\sqrt{1-\eta^2}}{2\eta^2-1} \right] \text{ if } \frac{1}{\sqrt{2}} \leq \eta \leq 1 \\ \exp \left[ -\frac{\eta}{\sqrt{\eta^2-1}} \ln \frac{\eta + \sqrt{\eta^2-1}}{\eta - \sqrt{\eta^2-1}} \right] \text{ if } \eta > 1 \end{cases} \quad (7)$$

Уравнение (7) было первоначально выведено Швагером и Пешелем [15] с учетом того, что окончание столкновения происходит, когда нормальная сила контакта уменьшается до нуля. В DEM обычно используется более простое выражение для соотношения между  $\varepsilon$  и  $\eta$ , полученное из условия, что окончание столкновения происходит позже, когда деформация возвращается к нулю. Однако легко показать, что нормальная сила, определяемая уравнением (7), в это время становится отрицательной. Поскольку отрицательная нормальная контактная сила является притягивающей, то предположение о чисто отталкивающей силе контакта противоречит этой практике.

Несмотря на то, что линейная модель упруго-точечного типа широко используется в DEM, она является менее точной, чем ЛУГМ, так как в природе диссипация энергии является пластичным процессом. В работе [16] показаны приемлемые результаты при моделировании погрузки суглинков в кузов карьерного самосвала.

Упруго-точечная линейная модель работает с моделью постоянной силы сцепления и моделью линейной силы сцепления, а также с моделью Кулоновского предела линейной упругости и моделью Кулоновского предела для касательной силы.

Нас же интересуют процессы, происходящие при наполнении ковша различными горными породами, включающие процессы налипания на элементы ковша. Поэтому рассмотрим следующие модели.

**Модель вязкоупругого тела Герца.** Упруго-точечная модель Герца может быть записана в виде [15]:

$$F_n = K_H s_n^{\frac{3}{2}} + C_H s_n^4 \frac{ds_n}{dt}, \quad (8)$$

в котором коэффициент жесткости  $K_H$  определяется как:

$$K_H = \frac{3}{4} E^* \sqrt{R^*} \quad (9)$$

где  $E^*$  – приведенный модуль Юнга, определяемый по выражению:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (10)$$

где  $E_1, E_2$  – модули Юнга двух частиц или частицы и границы раздела;  $\nu_1, \nu_2$  – соответствующие коэффициенты Пуассона;  $R^*$  – эквивалентный радиус, определяемый выражением:



$$\frac{1}{R^*} = \begin{cases} \frac{2}{L_1} + \frac{2}{L_2} & \text{при контакте частиц между собой} \\ \frac{2}{L_2} & \text{при контакте частиц и границы раздела} \end{cases} \quad (11)$$

в котором  $L_1$  и  $L_2$  – размеры контактирующих частиц при столкновении частица–частица, тогда как  $L$  – размер частицы при столкновении на границе раздела.

Коэффициент демпфирования для модели Герца определяется аналогично линейной пружинно-точечной модели:

$$C = 2\eta_H \sqrt{m \cdot K_H} \quad (12)$$

где  $m$  – эквивалентная масса, определенная ранее в уравнении (6);  $\eta_H$  – коэффициент демпфирования для модели пружинно-точечного типа Герца.

С учетом соответствующих преобразований переменных решение уравнения движения, основанного на модели Герца, может быть сопоставлено с решением эквивалентного уравнения, основанного на линейной упруго-точечной модели [17]. Эта эквивалентность возможна только в том случае, если коэффициент демпфирования для модели Герца определен как:

$$\eta_H = \frac{\sqrt{5}}{2} \eta \quad (13)$$

где  $\eta$  – это тот же коэффициент демпфирования, который используется в линейной упруго-точечной модели.

Упруго-точечная модель Герца более точно описывает процессы, происходящие в глинистых горных породах, и является базовой для нескольких ее модификаций, рассмотренных далее.

**Линейная упруго-фрикционная модель Кулона-Мора (ЛУФКМ).** Модель Кулона-Мора учитывает тангенциальные силы. Рассматривая Кулоновскую модель при чисто упругой силе, имеем [18, 19]:

$$F_{\tau,e}^t = F_{\tau}^{t-\Delta t} - K_{\tau} \cdot \Delta s_{\tau} \quad (14)$$

где  $F_{\tau}^{t-\Delta t}$  – тангенциальная сила в предшествующий момент времени;  $\Delta s_{\tau}$  – относительное касательное смещение частиц породы в течение заданного интервала;  $K_{\tau}$  – жесткость в тангенциальном направлении:

$$K_{\tau} = r_k \cdot K_{n,l} \quad (15)$$

где  $K_{n,l}$  – жесткость при нормальном направлении, определенная ранее в уравнении (2);  $r_k$  – коэффициент тангенциальной жесткости.

Практика показывает, что касательная сила при работе ковша с горными породами типа суглинков не может превышать Кулоновского предела. При этом ограничении запишем формулу в следующем виде [20, 21]:

$$F_{\tau}^t = \min(|F_{\tau,e}^t|, \mu F_n^t) \frac{F_{\tau,e}^t}{|F_{\tau,e}^t|}, \quad (16)$$

где  $F_n^t$  – нормальная сила контакта в момент времени  $t$ ;  $\mu$  – коэффициент трения.

Коэффициент трения в свою очередь представляет собой при отсутствии скольжения коэффициент трения покоя  $\mu_s$ , а при наличии проскальзывания –  $\mu_d$ .

ЛУФКМ целесообразно использовать для глинистых пород с влажностью до 10% при моделировании внедрения ковша гидравлического экскаватора.

**Модель Миндлина-Дересевича.** Тангенциальная сила определяется по следующей формуле [15, 22]:



$$F_{\tau} = -\mu F_n \left(1 - k^{\frac{3}{2}}\right) \frac{s_{\tau}}{|s_{\tau}|} + \eta_{\tau} \sqrt{\frac{6\mu \cdot m \cdot F_n}{s_{\tau, \max}} k^{\frac{1}{4}} \frac{ds_{\tau}}{dt}} \quad (17)$$

$$k = 1 - \frac{\min(|s_{\tau}|, s_{\tau, \max})}{s_{\tau, \max}}$$

где  $\mu$  – коэффициент трения (описан ранее);  $F_n$  – нормальная сила контакта;  $s_{\tau}$  – тангенциальное смещение частиц при контакте друг с другом;  $s_{\tau, \max}$  – максимальное относительное тангенциальное смещение, при достижении которого начинается взаимное смещение частиц;  $m$  – эквивалентная масса, описанная в (6);  $\eta_{\tau}$  – коэффициент демпфирования в тангенциальном направлении.

$$\eta_{\tau} = -\frac{\ln \varepsilon}{\sqrt{\ln \varepsilon^2 + \pi^2}} \quad (18)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент восстановления.

Максимальное относительное тангенциальное смещение:

$$s_{\tau, \max} = \mu \left( \frac{1 - \nu_1}{2 - \nu_1} + \frac{1 - \nu_2}{2 - \nu_2} \right)^{-1} s_n \quad (19)$$

где  $\nu_1$  и  $\nu_2$  – это коэффициенты Пуассона для двух взаимодействующих частиц или для частицы и границы раздела [22].

Недостатком модели Миндлина-Дересевича является некорректное сочетание с моделями, учитывающими сопротивление качению несферических тел.

При моделировании поведения горных пород в ковше экскаватора понимаем, что если свойства материала зависят от направления, то относительные величины касательных и нормальных компонент силы могут быть очень существенны. Рассмотрим далее модели, учитывающие силы сцепления или адгезии в нашем понятийном аппарате.

**Модель постоянной силы сцепления.** Другое название этой модели – модель сухого трения (далее МСТ), это упрощенная модель, предполагающая, что сила трения между двумя поверхностями остается постоянной, пока не будет достигнута определенная величина, после которой происходит скольжение. При правильной калибровке модель постоянной силы сцепления может быть использована для моделирования поведения адгезивных материалов, которые не проявляют эффекта уплотнения под действием напряжений, например, когда адгезия происходит за счет взаимодействия с жидкостью.

Это самая простая модель адгезии, которая описывается уравнением [14, 15]:

$$F_{n, adh} = \begin{cases} 0 & \text{if } -s_n \geq \delta_{adh} \\ f_{adh} g \min(m_1, m_2) & \text{if } -s_n < \delta_{adh} \end{cases} \quad (20)$$

где  $F_{n, adh}$  – нормальная сила адгезионного контакта;  $s_n$  – нормальное перекрытие контакта;  $m_1$  и  $m_2$  – масса двух взаимодействующих частиц, для упрощения можем принять  $m_1 = m_2$ ;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\delta_{adh}$  – длина зоны адгезии;  $f_{adh}$  – коэффициент сцепления (адгезии).

Сила сцепления действует только при расстоянии меньше, чем длина зоны адгезии  $\delta_{adh}$ ;

**Модель линейно-возрастающей силы трения или модель линейного трения (МЛТ)** – это модель, которая описывает силу трения между двумя контактирующими поверхностями как прямо пропорциональную нормальной силе, действующей между ними. В этой модели коэффициент трения считается константой, не зависящей от скорости скольжения или других факторов. Как и модель постоянной адгезионной силы, модель линейной адгезионной силы требует калибровки характеристик материала. Эта модель подходит для гранулированных материалов с уплотнением под действием напряжений. Модель линейной адгезионной силы может быть описана следующим выражением [18, 19]:



$$F_{n,adh} = \begin{cases} 0 & \text{if } -s_n \geq \delta_{adh} \\ r_{adh} K_{nl} (s_n + \delta_{adh}) & \text{в ином случае} \end{cases} \quad (21)$$

где  $r_{adh}$  – коэффициент жесткости адгезии;  $K_{nl}$  – нормальная жесткость, описанная ранее.

МЛТ, по сути, ведет себя как притягивающая линейная пружина. Когда два соседних объекта находятся отдельно, но близко друг к другу, сила сцепления равна нулю, если фактическое расстояние между ними больше, чем расстояние сцепления. Когда этот порог пройден и объекты сближаются, сила сцепления увеличивается пропорционально разнице между расстоянием склеивания и фактическим расстоянием разделения.

**Модель силы сцепления JKR.** Модель Джонсона-Кендалла-Робертса, (JKR), учитывает энергию сил поверхностного притяжения. При этом площадь контактного взаимодействия незначительно увеличивается, по сравнению с классической моделью Герца [20, 23].

$$F_{n,adh} = \sqrt{8\pi \cdot \Gamma \cdot E \cdot a^3} \quad (22)$$

где  $\Gamma$  – энергия поверхностного притяжения;  $E$  – модуль Юнга;  $a$  – радиус контакта между взаимодействующими частицами или между частицей и границей.

По данным практики рекомендуется использовать скорректированную формулу, использующую эквивалентный радиус (см. формулу (11)).

$$F_{n,e} = \frac{4E \cdot a}{3R^*} \quad (23)$$

Модель Джонсона-Кендалла-Робертса рационально использовать при моделировании глин и суглинков влажностью 15-20%.

Для проверки поведения глинистых пород будем придерживаться близких показателей, пока не наработаются уточненные параметры.

Важно понимать принцип поведения гранул породы в общем виде, поскольку даже для одного забоя свойства пород изменяются в зависимости от горно-геологических, горнотехнических и даже погодных условий [24, 25].

#### Анализ процессов взаимодействия породы с ковшом

При расчете поведения грунта в процессе загрузки-разгрузки экскаватора ковш рассматривается как объект исследования, связанный со средой множеством связей, которые определяют его состояние. Определение факторов, оказывающих непосредственное влияние на процессы взаимодействия ковша с окружающей средой, возможно при учете геометрических и конструктивных параметров ковша. Следует выделить зоны, в которых будет происходить взаимодействие, а также рассмотреть влияние возмущающих и управляющих внешних воздействий.

Влияние человека – оператора (машиниста выемочной машины) можно отнести и к управляющему, и к возмущающему фактору. Нередко опыт и квалификация оказывают существенное влияние на технологический процесс экскавации горных пород. Однако для целей настоящего исследования фактор влияния оператора напрямую не рассматривается в связи с тем, что в реальных производственных условиях за рычаги управления карьерным экскаватором привлекаются машинисты с различным стажем и опытом, имеющие соответствующие удостоверения.

Эти воздействия можно разделить на группы в зависимости от характера и доли участия в технологическом процессе, в общем виде объект можно охарактеризовать следующими параметрами (Рис. 3):

- входные параметры –  $x_1, x_2 \dots x_n$ ;
- управляющие воздействия –  $u_1, u_2 \dots u_n$ ;
- возмущающие воздействия –  $z_1, z_2 \dots z_n$ ;
- выходные параметры –  $y_1, y_2 \dots y_n$ ;

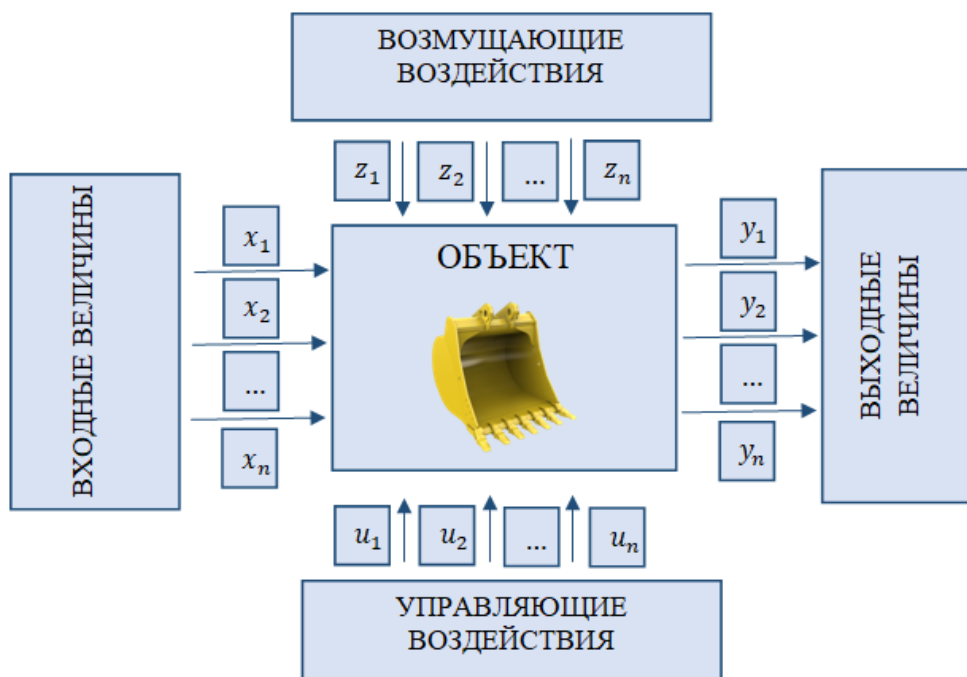


Рисунок 3 – Принципиальная схема воздействия на объект  
Figure 3 – Schematic diagram of the impact on the object

Если рассматривать ковш экскаватора как объект исследования, то все воздействия и величины будут выглядеть следующим образом (Рис. 4), где аббревиатура ГГУ означает горно-геологические условия:



Рисунок 4 – Структурная схема технологической системы «Среда – Ковш экскаватора»  
Figure 4 – Block diagram of the technological system «Environment – Excavator bucket»

Физико-механические свойства среды относятся к входным параметрам и в совокупности с управляющими параметрами, такими как конструкция ковша, геометрические размеры ковша и режимы нагружения, на выходе дают технико-эксплуатационный показатель – вместимость. Так как налипание непосредственно влияет на этот показатель, для дискретно-элементного моделирования процесс расчета был упрощен.

При работе гидравлических экскаваторов с навесным оборудованием типа «обратная лопата» черпание может осуществляться тремя способами: черпание рукоятью, черпание ковшом и черпание рукоятью и ковшом. Чаще всего черпание выполняется поворотом рукояти с ковшом относительно стрелы и опусканием последней, это происходит по мере выработки грунта в забое.

Для дискретно-элементного моделирования достаточно рассчитать черпание, начиная с момента внедрения ковша в грунт и до его разгрузки, схема представлена на рис. 5.

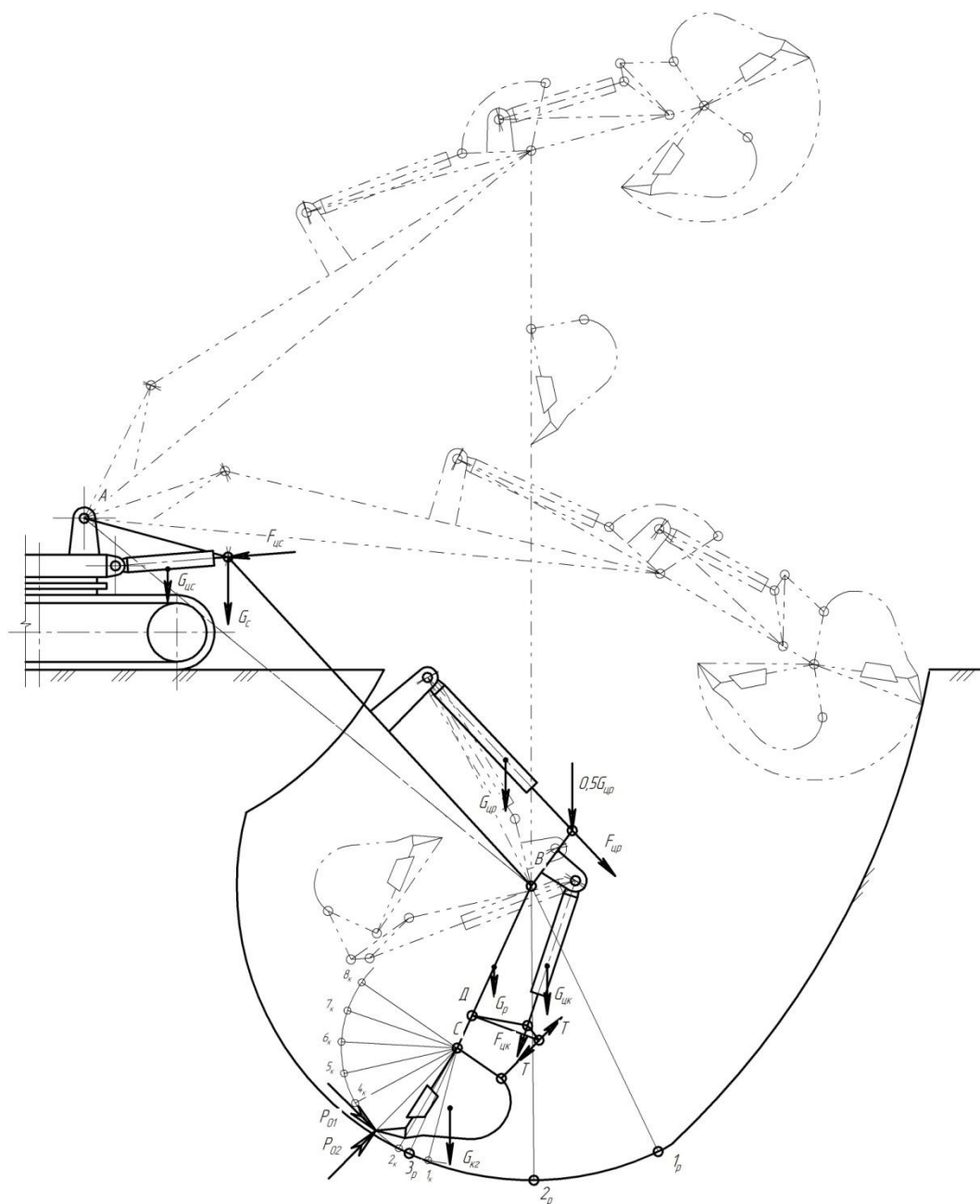


Рисунок 5 – Схема усилий, действующих на ковш обратной гидравлической лопаты  
Figure 5 – Diagram of the forces acting on the bucket of the backhoe

В свою очередь, каждое положение ковша в процессе черпания, особенно при взаимодействии с влагосодержащим грунтом будут формировать свои параметры, значительно влияющие на применение дискретно-элементных моделей. Так, для относительно сухого грунта (при влажности 7-15%) моделирование формирования стружки будет происходить по линейной упруго-гистерезисной модели (ЛУГМ) и по линейной упруго-точечной модели (ЛУТМ), где не будут использоваться условия демпфирования. При моделировании предпочтительно использовать модель ЛУГМ, потому что даже при внедрении в условно сухой грунт будет присутствовать малая часть деформации, т.к. в природе диссипация энергии является пластичным процессом. Схема заполнения ковша представлена на рис. 6.

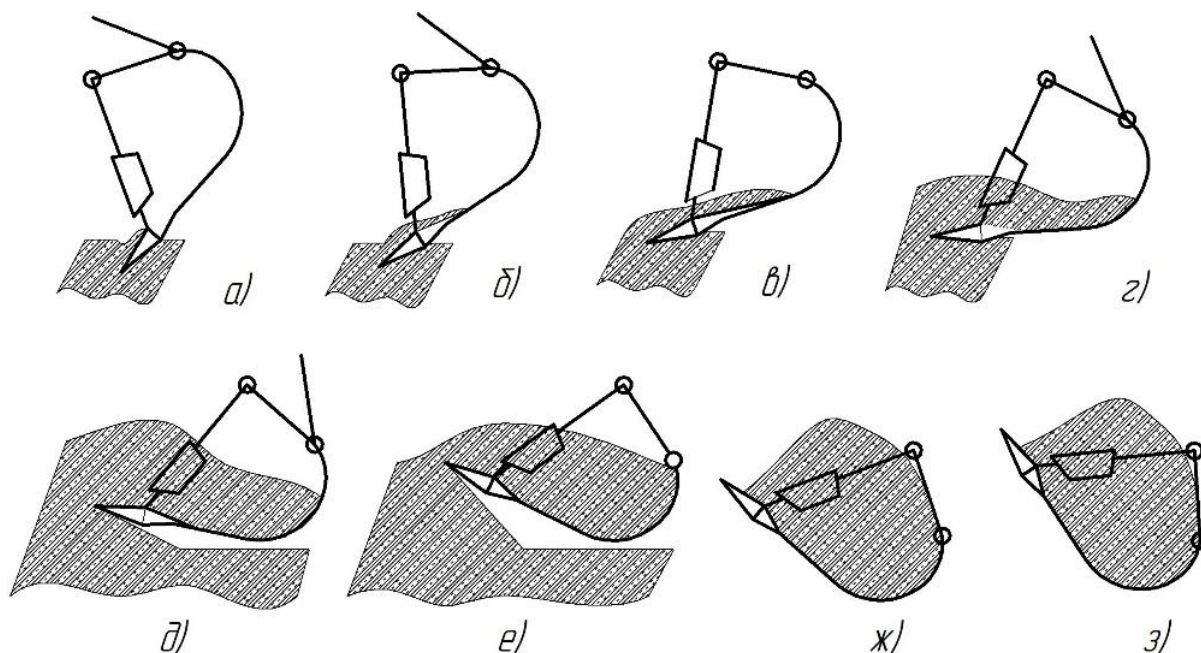


Рисунок 6 – Процесс внедрения ковша в условно сухой грунт, при разных положениях ковша, указанных на рис. 5: а) положение  $1_k$ ; б) положение  $2_k$ ; в) положение  $3_k$ ; г) положение  $4_k$ ; д) положение  $5_k$ ; е) положение  $6_k$ ; ж) положение  $7_k$ ; з) положение  $8_k$

Figure 6 – The process of embedding the bucket in conditionally dry soil, at different bucket positions indicated in Fig. 5: a) position  $1_k$ ; b) position  $2_k$ ; c) position  $3_k$ ; d) position  $4_k$ ; e) position  $5_k$ ; f) position  $6_k$ ; g) position  $7_k$ ; h) position  $8_k$

При влажности от 16% и выше образование стружки происходит по другому сценарию, так как влажность влияет на сцепление частиц между собой, поэтому использование простых моделей будет снижать точность результатов моделирования. При достижении задней стенки ковша образующаяся стружка будет ломаться и накладываться друг на друга. При этом поверхности стружки под давлением будут перемешиваться, слипаться между собой, образуя вязкую массу, нижний слой которой будет интенсивно прилипать к стальной поверхности ковша и к его отдельным элементам (Рис. 7).

При внедрении ковша в грунт напряжения не только возникают в точках контакта с элементами ковша, но и распространяются вглубь и вширь от области контакта, а при внедрении во влажный грунт в некоторых положениях ковша данные напряжения будут погашены другими силами из-за взаимной адгезии (см. рис. 8).

Для описания процесса с условно влажным грунтом при дискретно-элементном моделировании будут использоваться иные модели, такие как модель линейной когезии, в которой к компоненту нормальной силы добавляется сила когезии или сила адгезии, такая как модель Джонсона-Кенделла-Робертса (JKR), в которой тангенциальная контактная сила, а также нормальные и тангенциальные силы демпфирования сохраняются, а нормальная контактная сила

модифицируется для включения сцепления влажных частиц грунта. Именно эта модификация позволяет моделировать прочные адгезионные связи, существующие во влажных материалах, и улавливать влияние сил Ван-дер-Ваальса из-за контакта между двумя поверхностями.

Предлагаемые параметры для моделирования поведения породы при зачерпывании и разгрузке ковша представлены в таблице.

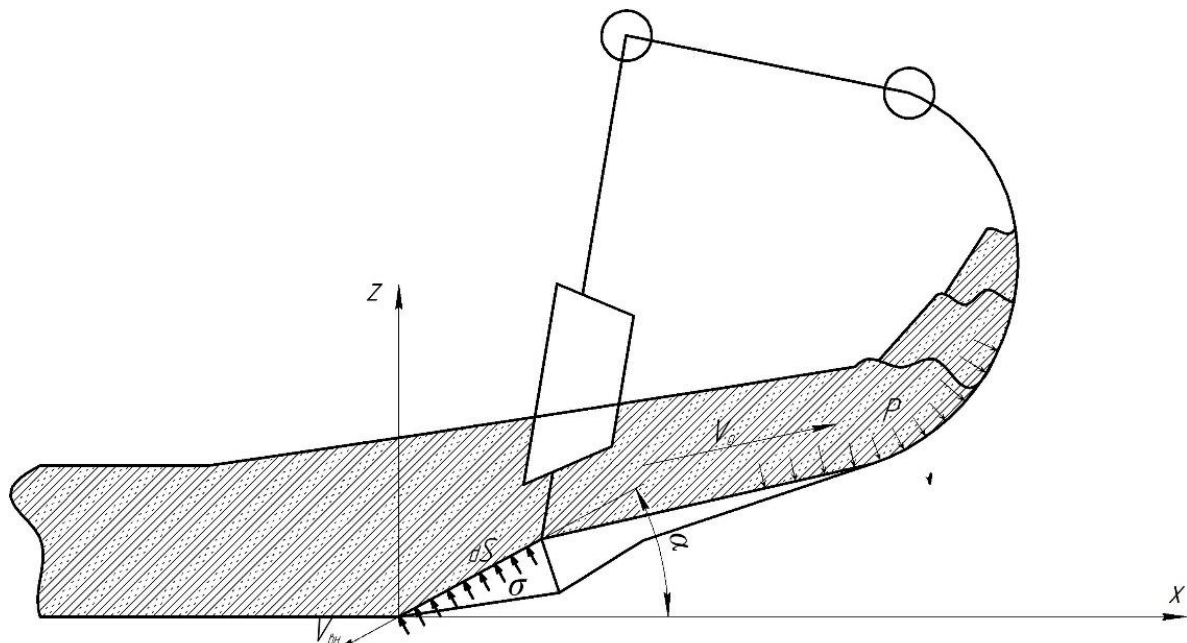


Рисунок 7 – Схема движения стружки влажного грунта по ковшу  
Figure 7 – Diagram of the movement of wet soil chips along the bucket

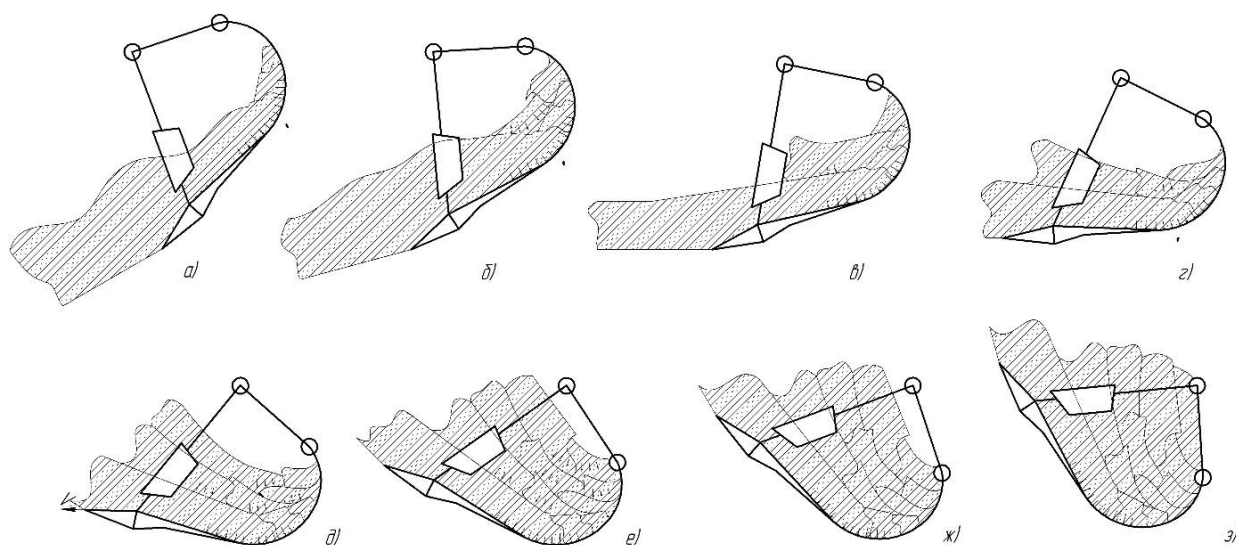


Рисунок 8 – Процесс внедрения ковша в условно влажный грунт, при разных положениях ковша, указанных на рис. 5: а) положение 1<sub>к</sub>; б) положение 2<sub>к</sub>; в) положение 3<sub>к</sub>; г) положение 4<sub>к</sub>; д) положение 5<sub>к</sub>; е) положение 6<sub>к</sub>; ж) положение 7<sub>к</sub>; з) положение 8<sub>к</sub>

Figure 8 – The process of introducing a bucket into conditionally moist soil, at different bucket positions indicated in Fig. 5: а) position 1<sub>к</sub>; б) position 2<sub>к</sub>; в) position 3<sub>к</sub>; д) position 4<sub>к</sub>; е) position 5<sub>к</sub>; ф) position 6<sub>к</sub>; г) position 7<sub>к</sub>; h) position 8<sub>к</sub>



Таблица – Параметры для работы с моделями МДЭ  
Table – Parameters for working DEM models

Параметр	Глина влажность 7 – 15% - сталь	Глина влажность 16 – 25% - сталь	Глина – глина влажность 7 – 15%	Глина – глина влажность 16 – 25%
Плотность пород, $\rho$	1,8 – 2,2			
Коэффициент трения покоя, $\mu_s$	0,65	0,80	0,6	0,7
Коэффициент трения скольжения, $\mu_d$	0,60	0,75	0,55	0,65
Коэффициент восстановления, $\epsilon$	0,25	0,3	0,22	0,27
Модуль Юнга – $E$	200-500	50-150	30-50	70-180
Коэффициент Пуассона – $\nu$	0,35	0,25	0,35	0,25

### Выводы

Рациональное освоение недр достигается комплексным применением методов оценки технического состояния, при этом наиболее важным является правильное проектирование конструкции горной машины [25-27].

При моделировании МДЭ (DEM) могут использоваться следующие модели:

- Линейная упруго-гистерезисная модель;
- Линейная упруго-точечная модель;
- Модель вязкоупругого тела Герца;
- Линейная упруго-фрикционная модель;
- Модель Миндлина-Дересевича;
- Модель сухого трения;
- Модель линейной силы сцепления;
- Модель силы сцепления Джонсона-Кендалла-Робертса.

Исследования поведения пород при черпании ковшем экскаватора показывают, что силы трения, возникающие при движении по днищу и внутренним поверхностям ковша, снижают качественные показатели при работе экскаватора [28]. Анализ процессов налипания горной массы, проведенный в работах [28, 29], а также проведенный обзор научных работ показывает, что для глин влажностью 16-28% подходят модели ЛУГМ и JKR, а для глин влажностью до 15% модель линейной силы сцепления и Миндлина-Дересевича. Для верификации адекватности модели поведению породы типа суглинка при зачерпывании ковшем гидравлического экскаватора требуется сравнение данных, полученных при моделировании и на лабораторном стенде.

В зависимости от уровня влажности и гранулометрического состава разрабатываемой породы будут меняться условия, задаваемые при моделировании. Понимание процессов поведения породы при внедрении ковша и его разгрузке позволит разработать геометрические параметры ковша, препятствующие налипанию горной массы на его элементы.

В настоящее время дискретно-элементное моделирование (МДЭ) используется не слишком часто из-за ряда ограничений, в том числе из-за отсутствия надежного метода для определения параметров реологических контактных моделей, именно при работе со сложными геометрическими формами разрушающих элементов. Другим ограничивающим фактором является необходимость постоянной калибровки параметров дискретных частиц и выбранной модели контакта на лабораторных стендах.

Корректность рассмотренных моделей после выполнения численного моделирования будет проверена на лабораторном стенде при создании подобных параметров и свойств горных пород.



## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

## Информация об авторах

**Мамаева Мария Сергеевна**, старший преподаватель кафедры ИТМА  
e-mail: art@mmamaeva.ru

**Кузин Евгений Геннадьевич**, к.т.н., доцент, начальник отдела научно-технического развития  
e-mail: kuzinengen@gmail.com

**Горюнов Сергей Викторович**, к.т.н., доцент кафедры ИТМА  
e-mail: goryunovsv@kuzstu.ru

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевске  
653033, Российская Федерация, Кемеровская область-Кузбасс, Прокопьевский городской округ, г.  
Прокопьевск, ул. Ноградская, 19а

**Хорешок Алексей Алексеевич**, доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры горных машин и  
комплексов  
e-mail: haa.omit@kuzstu.ru

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева  
650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

## Список литературы

1. Андреева, Л. И. Исследование эксплуатационной надежности карьерных автосамосвалов / Л. И. Андреева, Ю. Ю. Ушаков // Известия Уральского государственного горного университета. – 2016. – № 3(43). – С. 74-77. – DOI 10.21440/2307-2091-2016-3-74-77. – EDN WWNYML.
2. Андреева, Л. И. Выбор стратегии ремонтного обслуживания горной техники / Л. И. Андреева // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2021. – № 4. – С. 83-91. – DOI 10.21440/0536-1028-2021-4-83-91. – EDN ZYMIKS.
3. Андреева, Л. И. Рекомендации по совершенствованию системы ТОиР в изменяющихся условиях функционирования горнодобывающих предприятий / Л. И. Андреева // Проблемы недропользования. – 2024. – № 1(40). – С. 81-88. – DOI 10.25635/2313-1586.2024.01.081. – EDN FMTMMA.
4. Цифровая модель процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием карьерного экскаватора / А. П. Комиссаров, Ю. А. Лагунова, Р. Ш. Набиуллин, С. А. Хорошавин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 4. – С. 156-168. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2022\_4\_0\_156. – EDN BLPOYX.
5. Лагунова, Ю. А. Анализ методов диагностирования состояния металлоконструкций на примере экскаваторостроения / Ю. А. Лагунова, В. В. Макарова, Р. Ш. Набиуллин // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – № 6(164). – С. 17-25. – DOI 10.26730/1816-4528-2022-6-17-25. – EDN ZITCLC.
6. Performability of electro-hydro-mechanical rotary head of drill rig in open pit mining: A case-study / R. O. Muminov, D. A. Kuziev, V. V. Zotov, E. S. Sazankova // Eurasian Mining. – 2022. – No. 1. – P. 76-80. – DOI 10.17580/em.2022.01.16. – EDN KZTIDA.
7. Алгоритм определения максимальной мощности привода подачи карьерного бурового станка / Д. А. Кузиев, И. Ю. Пятова, И. Н. Клементьева, Д. Пихторинский // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 1. – С. 128-133. – DOI 10.25018/0236-1493-2019-01-0-128-133. – EDN YSTMSL.
8. Соколов, В.Н. Микромир глинистых пород // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – №. 3. – С. 56-64.
9. Cundall P. A. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies / P. A. Cundall, O.D. Strack // Geotechnique. – 1979. – 29. – P. 47-65.



10. Гайнуллин, И.А. Моделирование взаимодействия движителей с почвой методом дискретных элементов в программе ROCKY DEM / И.А. Гайнуллин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – №5 (131). – URL: <https://research-journal.org/archive/5-131-2023-may/10.23670/IRJ.2023.131.29> (дата обращения: 15.09.2025). – DOI: 10.23670/IRJ.2023.131.29
11. Mustafa Ucgul, John M. Fielke, Chris Saunders, 3D DEM tillage simulation: Validation of a hysteretic spring(plastic) contact model for a sweep tool operating in a cohesionless soil, Soil and Tillage Research, Volume 144, 2014, Pages 220-227, <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.10.003>.
12. Высотин Н. Г., Винников В. А. Опыт построения модели упругого гистерезиса горных пород различных генотипов на основе теории Прейсаха // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11. – С. 5–16. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_11\_0\_5.
13. Баженова, А. В. Прогнозирование смещения рудных контуров при формировании развала взорванной горной массы на карьерах: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук / Баженова Александра Владимировна. – Санкт-Петербург, 2023. – 23 с. – EDN OJMPJU.
14. Mustafa Ucgul, Chris Saunders, John M. Fielke, Discrete element modelling of top soil burial using a full scale mouldboard plough under field conditions, Biosystems Engineering, Volume 160, 2017, Pages 140-153, ISSN 1537-5110, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.008>.
15. Фархутдинов Ильдар Мавлярович. Научное обоснование и разработка энергосберегающих почвообрабатывающих и посевных машин на основе цифровых двойников. Диссертация на соискание степени доктора технических наук по специальности 4.3.1 - Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса. Уфа, 2024, 415 с.
16. Дубинкин, Д. М. Определение параметров модели суглинка и глины для имитационного моделирования погрузки и разгрузки грузовой платформы карьерного самосвала / Д. М. Дубинкин, Ш. Я. Исмаилова // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2023. – № 6(160). – С. 94-104. – DOI 10.26730/1999-4125-2023-6-94-104. – EDN JWQMCQ.
17. Modeling the technological process of tillage / S. G. Mudarisov, I. I. Gabitov, Y. P. Lobachevsky [et al.] // Soil & Tillage Research. – 2019. – Vol. 190. – P. 70-77. – DOI 10.1016/j.still.2018.12.004. – EDN PPQETF.
18. H.O.N. Altino, G.A. Lourenço, C.H. Ataíde. System development for bulk density data acquisition of granular materials: Effect of operational conditions and optimization. Powder Technology, 2021;391:184-197. doi:10.1016/j.powtec.2021.06.013
19. Crassous, J. Discrete-element-method model for frictional fibers / J. Crassous // Physical Review E. – 2023. – Vol. 107, No. 2. – P. 025003. – DOI 10.1103/physreve.107.025003. – EDN LNMDOP.
20. Th. Poschel, Th. Schwager. Computational Granular Dynamics. Models and Algorithms. – Berlin, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. – 323 с.
21. Мударисов С. Г., Фархутдинов И. М., Багаутдинов Р. Ю. Обоснование параметров комбинированного сошкина в цифровом двойнике методом дискретных элементов // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 2. С. 229–243. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.229-243>
22. Mindlin R.D., Deresiewicz H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces. J. Appl. Mech., Trans. ASME. – 1953. – 20. – p. 327-344
23. Инновационные подходы к совершенствованию исполнительных органов и инструмента выемочно-проходческих горных машин / А. А. Хорешок, Л. Е. Маметьев, А. Ю. Борисов, О. А. Алиткина // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: Сб. тез. докл. VIII междунар. науч.-техн. конф., Алчевск, 23–24 октября 2024 года. – Алчевск: Донбасский государственный технический университет, 2024. – С. 205-207. – EDN NPAMEX.
24. Об изменении производительности обратных гидравлических лопат при разных схемах погрузки вскрыши в карьерные самосвалы / А. А. Хорешок, Д. М. Дубинкин, Я. О. Литвин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2024. – № 4. – С. 26-34. – DOI 10.21440/0536-1028-2024-4-26-34. – EDN NTPNQQ.
25. Горюнов, С. В. Оценка системы технического обслуживания и ремонта карьерных автосамосвалов на угледобывающих предприятиях Кузбасса / С. В. Горюнов, А. А. Хорешок // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сб. тр. XXI Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 06–07 апреля 2023 года / Под общей редакцией Ю.А. Лагуновой. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2023. – С. 358-362. – EDN UTHNMI.
26. Кузин, Е. Г. Модели предельного состояния приводных станций ленточных конвейеров / Е. Г. Кузин, Б. Л. Гери́ке, А. Ю. Захаров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 8. – С. 92-107. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2024\_8\_0\_92. – EDN RQBASS.



27. Кузин, Е. Г. Предиктивное управление техническим состоянием горных транспортных машин / Е. Г. Кузин // Горное оборудование и электромеханика. – 2023. – № 1(165). – С. 41-49. – DOI 10.26730/1816-4528-2023-1-41-49. – EDN WPCNPB.
28. Мамаева, М. С. Влияние свойств влагосодержащих грунтов на усилия сопротивления копанью ковшом экскаватора тип «Обратная лопата» / М. С. Мамаева, С. В. Горюнов, А. А. Хорешок // Горное оборудование и электромеханика. – 2024. – № 2(172). – С. 51-58. – DOI 10.26730/1816-4528-2024-2-51-58. – EDN NIXCZM.
29. Мамаева, М. С. Моделирование процессов налипания и намерзания горной массы на рабочее оборудование экскаваторов / М. С. Мамаева, С. В. Горюнов, А. А. Хорешок // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сб. тр. XXI Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 06–07 апреля 2023 года / Под общей редакцией Ю.А. Лагуновой. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2023. – С. 69-75. – EDN IOJKBA.

## ANALYTICAL REVIEW OF DISCRETE ELEMENT MODELS FOR SIMULATING THE LOADING AND UNLOADING PROCESSES OF A HYDRAULIC EXCAVATOR BUCKET

Maria S. Mamaeva<sup>1</sup>, Eugeny G. Kuzin<sup>1</sup>, Alexey A. Khoreshok<sup>2</sup>, Sergey V. Goryunov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Prokopyevsk branch of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

<sup>2</sup> T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University



### Article info

Received:  
05 August 2025

Revised:  
18 September 2025

Accepted:  
22 September 2025

**Keywords:** rock adhesion, silty loam, excavator bucket, hydraulic excavator, discrete element modeling, models for numerical modeling

### Abstract.

A review of scientific publications devoted to the problems of rock adhesion to mining machine components was conducted. During the operation of truck-excavator complexes or rock overburden removal by draglines, rock adhesion reduces the useful volume of the bucket by 15-20%. In order to prevent excessive rock adhesion to the bucket, it is necessary to study the particle movement processes that occur during loading and unloading of the bucket. When determining the stickiness of dusty loams when working with moisture-containing rocks, it is quite difficult to calculate the trajectories of soil particle movement. Different forces will act on each of the particles, and each particle will have a set of constants, which makes modeling this process practically impossible. The use of the discrete element modeling method allows the modeled material to be represented as a collection of individual particles that are solid bodies. This article discusses the process of loading and unloading a backhoe excavator bucket using the discrete element method. An analytical review of the developed models used in discrete element modeling is provided, and their advantages for different types of rocks are shown. The characteristic parameters of discrete element modeling of soil movement in an excavator bucket are given, allowing the calculations performed by modeling to be approximated to the actual behavior of the material. Understanding the process of interaction between rock particles and the elements of the bucket walls allows us to justify the spatial and geometric parameters of the walls, which reduce the effect of moist clayey rocks sticking to them.

**For citation** Mamaeva M.S., Kuzin E.G., Khoreshok A.A., Goryunov S.V. Analytical review of discrete element models for simulating the loading and unloading processes of a hydraulic excavator bucket. *Journal of mining and geotechnical engineering*. 2025;3(30):57-75. DOI: 10.26730/2618-7434-2025-3-57-75, EDN: IDVPUW



## References

1. Andreeva, L. I. Research on the operational reliability of mining dump trucks / L. I. Andreeva, Yu. Yu. Ushakov // News of the Ural State Mining University. – 2016. – No. 3(43). – P. 74-77. – DOI 10.21440/2307-2091-2016-3-74-77. – EDN WWNYML.
2. Andreeva, L. I. Selection of a repair maintenance strategy for mining equipment / L. I. Andreeva // News of Higher Educational Institutions. Mining Journal. – 2021. – No. 4. – Pp. 83-91. – DOI 10.21440/0536-1028-2021-4-83-91. – EDN ZYMIKC.
3. Andreeva, L. I. Recommendations for improving the maintenance and repair system in the changing operating conditions of mining enterprises / L. I. Andreeva // Problems of Subsurface Use. – 2024. – No. 1(40). – P. 81-88. – DOI 10.25635/2313-1586.2024.01.081. – EDN FMTTMA.
4. Digital model of the rock excavation process using quarry excavator equipment / A. P. Komissarov, Yu. A. Lagunova, R. Sh. Nabiullin, S. A. Khoroshavin // Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). – 2022. – No. 4. – P. 156-168. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2022\_4\_0\_156. – EDN BLPOYX.
5. Lagunova, Yu. A. Analysis of methods for diagnosing the condition of metal structures using the example of excavator construction / Yu. A. Lagunova, V. V. Makarova, R. S. Nabiullin // Mining Equipment and Electromechanics. – 2022. – No. 6(164). – Pp. 17-25. – DOI 10.26730/1816-4528-2022-6-17-25. – EDN ZITCLC.
6. Operational performance of an electrohydraulic rotating head of a drilling rig in open-pit mining: A case study / R. O. Muminov, D. A. Kuziev, V. V. Zotov, E. S. Sazankova // Eurasian Mining. – 2022. – No. 1. – P. 76-80. – DOI 10.17580/em.2022.01.16. – EDN KZTIDA.
7. Algorithm for determining the maximum power of the drive for a quarry drilling rig / D. A. Kuziev, I. Yu. Pyatova, I. N. Klementieva, D. Pikhtoirinsky // Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). – 2019. – No. 1. – P. 128-133. – DOI 10.25018/0236-1493-2019-01-0-128-133. – EDN YSTMSL.
8. Sokolov, V. N. The Microcosm of Clay Rocks // Soros Educational Journal. – 1996. – No. 3. – P. 56-64.
9. Cundall P. A. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies / P. A. Cundall, O. D. Strack // Geotechnics. – 1979. – 29. – P. 47-65.
10. Gainullin, I. A. Modeling the interaction of propulsion systems with soil using the discrete element method in the ROCKY DEM program / I. A. Gainullin // International Scientific Research Journal. – 2023. – No. 5 (131). – URL: <https://research-journal.org/archive/5-131-2023-may/10.23670/IRJ.2023.131.29> (accessed: 15.09.2025). – DOI: 10.23670/IRJ.2023.131.29
11. Mustafa Ucgul, John M. Fielke, Chris Saunders, 3D DEM modeling of soil cultivation: Validation of a hysteretic spring (plastic) contact model for a sweeping implement operating in unbound soil, Soil and Tillage Research, vol. 144, 2014, pp. 220-227
12. Vysotyn, N. G., Vinnikov, V. A. Experience in constructing a model of elastic hysteresis of rocks of different genotypes based on Preissach's theory // Mining Information and Analytical Bulletin. – 2023. – No. 11. – Pp. 5–16. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_11\_0\_5.
13. Bazhenova, A. V. Forecasting the displacement of ore contours during the formation of the collapse of blasted rock mass in quarries: abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Bazhenova, Alexandra Vladimirovna. – Saint Petersburg, 2023. – 23 p. – EDN OJMPJU.
14. Mustafa Ucgul, Chris Saunders, John M. Fielke, Discrete element modeling of top soil burial using a full-scale moldboard plow under field conditions, Biosystems Engineering, Volume 160, 2017, Pages 140-153, ISSN 1537-5110, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.008>.
15. Farkhutdinov, Ildar M. Scientific justification and development of energy-saving soil cultivation and sowing machines based on digital twins // Dr.Sc. dissertation. Ufa, 2024, 415 p.
16. Dubinkin, D. M. Determination of loam and clay model parameters for simulation modeling of loading and unloading of a dump truck platform / D. M. Dubinkin, Sh. Ya. Ismailova // Bulletin of Kuzbass State Technical University. – 2023. – No. 6(160). – P. 94-104. – DOI 10.26730/1999-4125-2023-6-94-104. – EDN JWQMCQ.
17. Modeling the technological process of tillage / S. G. Mudarisov, I. I. Gabitov, Y. P. Lobachevsky [et al.] // Soil & Tillage Research. – 2019. – Vol. 190. – P. 70-77. – DOI 10.1016/j.still.2018.12.004. – EDN PPQETF.
18. H.O.N. Altino, G.A. Lourenço, C.H. Ataíde. System development for bulk density data acquisition of granular materials: Effect of operational conditions and optimization. Powder Technology, 2021;391:184-197. doi:10.1016/j.powtec.2021.06.013.
19. Crassous, J. Discrete-element-method model for frictional fibers / J. Crassous // Physical Review E. – 2023. – Vol. 107, No. 2. – P. 025003. – DOI 10.1103/physreve.107.025003. – EDN LNMDOP.
20. Th. Poschel, Th. Schwager. Computational Granular Dynamics. Models and Algorithms. – Berlin, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. – 323 c.
21. Mudarisov, S. G. Justification of Dual-Level Opener Parameters in Digital Twin by the Discrete Element Method / S. G. Mudarisov, I. M. Farkhutdinov, R. Yu. Bagautdinov // Engineering Technologies and Systems. – 2024. – Vol. 34, No. 2. – P. 229-243. – DOI 10.15507/2658-4123.034.202402.229-243. – EDN HQUNYC.
22. Mindlin R.D., Deresiewicz H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces. J. Appl. Mech., Trans. ASME. – 1953. – 20. – p. 327-344



23. Innovative approaches to improving the executive bodies and tools of excavating and tunneling machines / A.A. Khoreshok, L.E. Mametyev, A.Yu. Borisov, O.A. Alitkina // Ways to improve technological processes and equipment in industrial production: Abstracts from the VIII International Scientific and Technical Conference, Alchevsk, October 23–24, 2024. – Alchevsk: DSTU, 2024. – P. 205–207. – EDN NPAMEX.
24. On changes in the productivity of reverse hydraulic blades under different schemes of loading overburden into dump trucks / A. A. Khoreshok, D. M. Dubinkin, Ya. O. Litvin [et al.] // News of Higher Educational Institutions. Mining Journal. – 2024. – No. 4. – P. 26-34. – DOI 10.21440/0536-1028-2024-4-26-34. – EDN NTPNQQ.
25. Goryunov, S. V. Assessment of the maintenance and repair system for mining dump trucks at coal mining enterprises in Kuzbass / S. V. Goryunov, A. A. Khoreshok // Technological equipment for the mining and oil and gas industries: International Scientific and Technical Conference Procedia. – Yekaterinburg: Ural State Mining University, 2023. – pp. 358–362. – EDN UTHHMI.
26. Kuzin, E. G. Models of the limiting state of belt conveyor drive stations / E. G. Kuzin, B. L. Gerike, A. Yu. Zakharov // Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). – 2024. – No. 8. – P. 92–107. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2024\_8\_0\_92. – EDN RQBASS.
27. Kuzin, E. G. Predictive control of the technical condition of mining transport machines / E. G. Kuzin // Mining Equipment and Electromechanics. – 2023. – No. 1(165). – P. 41-49. – DOI 10.26730/1816-4528-2023-1-41-49. – EDN WPCNPB.
28. Mamaeva, M. S. Influence of moisture-containing soil properties on the resistance to digging with a backhoe excavator bucket / M. S. Mamaeva, S. V. Goryunov, A. A. Khoreshok // Mining Equipment and Electromechanics. – 2024. – No. 2(172). – P. 51-58. – DOI 10.26730/1816-4528-2024-2-51-58. – EDN NIXCZM.
29. Mamaeva, M. S. Modeling of the processes of sticking and freezing of rock mass on the working equipment of excavators / M. S. Mamaeva, S. V. Goryunov, A. A. Khoreshok // Technological equipment for the mining and oil and gas industries: International Scientific and Technical Conference Procedia. – Yekaterinburg: Ural State Mining University, 2023. – P. 69-75. – EDN IOJKBA.

### Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

### Information about the authors

**Maria S. Mamaeva**, senior lecturer, chair of Information Technology, Mechanical Engineering, and Motor Transport  
e-mail: [art@mmamaeva.ru](mailto:art@mmamaeva.ru)

**Eugene G. Kuzin**, PhD (Engineering), Associate Professor, Head of Scientific and Technical Development Department  
e-mail: [kuzinegen@gmail.com](mailto:kuzinegen@gmail.com)

**Sergey V. Goryunov**, PhD (Engineering), Associate Professor, chair of Information Technology, Mechanical Engineering, and Motor Transport  
e-mail: [goryunovsv@kuzstu.ru](mailto:goryunovsv@kuzstu.ru)

Prokopyevsk branch of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University  
653039, Russia, Prokopyevsk, 19a Nogradskaya str.

**Alexey A. Khoreshok**, Dr. Sc. (Engineering), Professor,  
e-mail: [haa.omit@kuzstu.ru](mailto:haa.omit@kuzstu.ru)

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University  
28 Vesenniyaya str., Russian Federation, Kemerovo, 650000

