

Научная статья

УДК 622.64

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-3-105-118

Мамаева Мария Сергеевна¹, Хорешок Алексей Алексеевич², Кузин Евгений Геннадьевич^{1, 3},
Удалова Юлия Сергеевна¹

¹ Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевске

² Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

³ Институт угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук

* для корреспонденции: art@mmamaeva.ru

РАЗРАБОТКА ФИЗИКО-ЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАЛИПАНИЯ ГРУНТА НА КОВШ ЭКСКАВАТОРА

Аннотация.

В статье рассматривается актуальная проблема повышения производительности гидравлических экскаваторов типа «обратная лопата» путем уменьшения налипания влажностенных грунтов. Активное налипание грунтов на рабочие органы выемочных машин, а также кузова автосамосвалов характерно для условий большинства горнодобывающих предприятий в весенне-осенний период. В работе проведен анализ литературы и рассмотрены ограничения существующих методов количественной оценки налипания грунтов на элементы конструкции землеройных машин. Предложен комплексный подход к цифровизации процесса черпания, интегрирующий DEM-моделирование, кинематический анализ рабочего оборудования на основе формализма Денавита–Хартенберга и данные специализированных измерительных систем. Разработана лабораторная установка, воспроизводящая полный динамический цикл «черпание – подъем – выгрузка» с синхронной регистрацией массы налипающего грунта и его влажности. Введен оригинальный метод количественной оценки «мертвых зон» ковша на основе анализа векторов нормалей к поверхности ($n_z > 0,5$, $n_x < -0,3$), позволяющий обоснованно выбирать конструкцию рабочего органа (тип ковша). Построена адаптивная физико-эмпирическая модель адгезии, учитывающая восемь ключевых факторов: влажность, число пластичности, температуру, контактное давление, шероховатость, краевой угол смачивания, кислотность и содержание органики. Предложена формула расчета часовой производительности экскаватора в условиях эксплуатации с учетом рассчитываемого коэффициента наполнения ковша, учитывающего налипание горной массы. Получены опытные данные по зависимости липкости (силы отрыва) грунтов от их влажности, имеющие высокий коэффициент детерминации $R^2 = 0,92$, соответствующие нормальному (Гауссовому) распределению. Показано, что максимальная сила отрыва (липкость) для пылеватых суглинков (на основе каолиновых глин, преобладающих в Кузбассе) достигается при влажности $\omega = 24,3\%$. Предложенный метод анализа нормалей позволяет обоснованно выбирать конструкцию рабочего органа для работы с глинистыми породами. Внедрение разработанной модели на угольных предприятиях позволяет снизить потери производительности на 15–20% за счет рациональных режимов работы и технического сервиса (своевременной очистки, обновления футеровки). Модель демонстрирует высокую адаптивность для различных месторождений.



Информация о статье

Поступила:

04 марта 2026 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 мая 2026 г.

Принята к печати:

15 июня 2026 г.

Ключевые слова:

гидравлический экскаватор, обратная лопата, влажные суглинки, влажностенные грунты, налипание грунта, цифровизация процесса черпания, DEM-моделирование, кинематическая модель, формализм Денавита–Хартенберга, лабораторная установка, физико-эмпирическая модель, определение «мертвых зон»

Введение / Introduction

Эксплуатация горно-выемочных и землеройных машин в регионах с умеренным климатом, таких как Кузбасс, сопряжена с серьезной технологической проблемой – интенсивным налипанием влажосодержащих грунтов на внутреннюю поверхность рабочего оборудования. Особенно остро этот вопрос стоит при разработке пылеватых суглинков в весенний и осенний периоды, когда влажность грунта достигает 18–22%. В этом диапазоне наблюдается максимум адгезионных свойств, обусловленный формированием капиллярных мостиков между частицами грунта и поверхностью ковша. Последствия налипания носят комплексный характер: снижается коэффициент наполнения k_z на 15–25%; возрастает изгибающий момент на стреле и рукояти; увеличивается удельное энергопотребление, а также возникает необходимость периодической очистки ковша, вызывающая дополнительные простои. Совокупный экономический ущерб для горного предприятия может достигать значительных сумм, что делает задачу прогнозирования объемов налипания и их минимизации одной из актуальных и приоритетных в области горного машиностроения.

Существующие методы оценки налипания можно разделить на три основные группы. Первая группа – эмпирические зависимости, основанные на усредненных коэффициентах, полученных в ходе натурных испытаний. Такие методы просты в применении, но не учитывают конкретные условия эксплуатации, тип грунта и конструкцию ковша, что ограничивает их точность [1, 2]. В процессе налипания участвуют несколько факторов, существенно зависящих не только от физических параметров и температурно-влажностного режима, но и от электродинамических, магнитоэлектрических параметров, а также от химического состава и распределения минералов в контактном слое [3, 4].

Вторая группа представляет численные модели, в первую очередь метод дискретных элементов (МДЭ/DEM). МДЭ позволяет визуализировать процесс взаимодействия отдельных частиц грунта с поверхностью ковша и дает богатую информацию о динамике процесса [5, 6]. Однако его практическое применение сдерживается двумя факторами: высокой вычислительной сложностью и, что более важно, отсутствием достоверных экспериментальных данных для калибровки ключевых параметров контакта (коэффициентов трения, адгезии, демпфирования) [7, 8]. Главная сложность моделирования состоит в том, что макроскопические свойства грунта не связаны напрямую с микропараметрами DEM и не могут быть физически измерены в лаборатории.

Третья группа – лабораторные установки, предназначенные для физического моделирования процесса. Большинство известных решений, включая устройства, описанные в патентной литературе,

реализуют статический режим испытаний, заключающийся в однократном вдавлении штампа в грунт [9, 10]. Такой подход не отражает реальной динамики полного рабочего цикла «черпание – выгрузка», а также, как правило, не предусматривает контроля влажности грунта в ходе эксперимента. Отмеченное обстоятельство делает результаты испытаний непригодными для количественного анализа в условиях, близких к производственным.

Таким образом, актуальной задачей становится разработка нового, комплексного подхода, который бы преодолел разрыв между физическим экспериментом и цифровым моделированием. Такой подход должен базироваться на трех ключевых компонентах: специализированной лабораторной установке, воспроизводящей динамический цикл работы экскаватора; новом методе количественной оценки геометрических факторов, влияющих на налипание; и, наконец, на физико-эмпирической модели, интегрирующей данные эксперимента и геометрического анализа для инженерного прогноза. При этом увеличение входных факторов для повышения точности модели должно соответствовать рациональному подходу и не увеличивать длительность вычислений. Как правило, меньшее количество точно известных существенно влияющих переменных приводит к более точному результату, чем большее количество мало влияющих и менее определенных переменных, закладываемых в модель.

Материалы и методы / Materials and methods *Лабораторная установка для моделирования динамического цикла черпания*

Основой предложенного подхода является специально разработанная лабораторная установка, предназначенная для физического моделирования процесса черпания [11]. Главным отличием данной установки от существующих аналогов является ее ориентация на динамический режим работы. Установка воспроизводит полный цикл, характерный для гидравлического экскаватора типа «обратная лопата», включающий фазы погружения ковша в грунт, его заполнения, подъема и последующей выгрузки. Такой подход позволяет исследовать не только начальное сцепление грунта с поверхностью, но и, что гораздо важнее, процесс его накопления цикл за циклом, что является ключевым фактором в реальных условиях эксплуатации. Конструктивно установка состоит из прочной станины, на которой смонтированы стрела и рукоять, и системы для крепления сменных ковшей различных типов и конструкций [12]. Также рядом с установкой смонтирован грунтовый контейнер (Рис. 1). Приводной модуль имитирует траекторию движения ковша, соответствующую реальному циклу черпания. Эта траектория может быть запрограммирована и изменена в зависимости от задач исследования, что обеспечивает гибкость установки [13].

Ключевой особенностью установки является возможность синхронной регистрации массы налипшего грунта и его влажности в автоматическом режиме. Данные записываются в цифровом виде, что обеспечивает их воспроизводимость и готовность к последующей обработке. Контроль влажности грунта в течение всего эксперимента исключает искажение результатов, вызванное естественным испарением влаги, и позволяет устанавливать прямую причинно-следственную связь между состоянием грунта и динамикой налипания. Таким образом, созданная установка обеспечивает получение достоверных, синхронизированных и машинно-читаемых данных, которые являются необходимой основой для калибровки численных моделей и построения зависимостей. Главным преимуществом представленной лабораторной установки является способность моделировать реальный процесс черпания – выгрузки, а не только его упрощенную статическую проекцию.

Метод расчета объема «мертвых зон» на основе анализа нормалей

Вторым ключевым компонентом комплексного подхода является новый метод количественной оценки геометрического фактора, влияющего на налипание – так называемых «мертвых зон». Под «мертвыми зонами» понимаются области внутри

ковша, в которые грунт либо не попадает при черпании, либо, что более важно для данной задачи, из которых он не выгружается полностью при опрокидывании ковша для выгрузки. Наличие таких зон приводит к накоплению налипшего материала, который в последующих циклах усугубляет проблему, снижая эффективный объем ковша и ухудшая условия для заполнения новой порцией грунта. Происходит послойное налипание, в крайнем случае перекрывающее геометрический объем ковша до 35–40%.

Предложенный метод основан на анализе геометрии внутренней поверхности ковша. В качестве исходных данных используется его трехмерная CAD-модель, экспортированная в полигональный формат STL. Внутренняя поверхность ковша аппроксимируется совокупностью треугольных элементов (граней) [14, 15]. Для каждой такой грани вычисляется единичный вектор внешней нормали $n = (n_x; n_y; n_z)$, направленный внутрь рабочей полости ковша. Система координат выбирается следующим образом: ось x направлена вперед (в сторону движения экскаватора и выгрузки грунта), ось z – вертикально вверх (Рис. 2).

Физическая суть метода заключается в том, что участок поверхности будет удерживать грунт, если



Рис. 1. Лабораторная установка, предназначенная для физического моделирования процесса черпания
Fig. 1. Laboratory installation designed for physical modeling of the scooping process

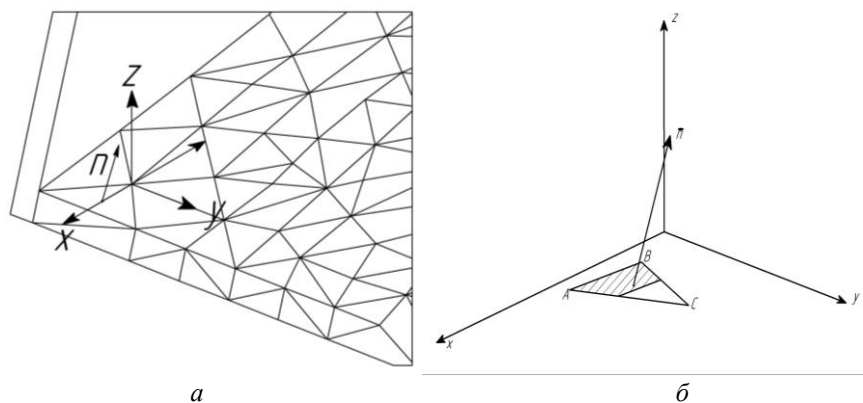


Рис. 2. Схема расстановки векторов нормалей и зон адгезии на треугольном элементе внутренней поверхности ковша: а – разбивка ковша на треугольные элементы; б – вектор нормали для одного элемента
Fig. 2. Diagram of the arrangement of vectors of normals and adhesion zones on a triangular element of the inner surface of the bucket: a – is the breakdown of the bucket into triangular elements; b – is the normal vector for one element

его нормаль направлена одновременно вверх и назад. Это создает условия, при которых сила тяжести не может преодолеть силы трения и адгезии, и материал остается на месте. Формально это условие выражается системой неравенств:

$$n_z > 0,5 \text{ и } n_x < -0,3 \quad (1)$$

Первое неравенство ($n_z > 0,5$) означает, что поверхность наклонена более чем на 60° к горизонтали, что является пороговым значением для начала скольжения большинства связных грунтов. Второе неравенство ($n_x < -0,3$) указывает на то, что поверхность обращена в сторону, противоположную направлению выгрузки, что дополнительно затрудняет сход грунта.

Для всей поверхности ковша подсчитывается доля площади, удовлетворяющей данному условию. Поскольку толщину слоя налипшего грунта в первом приближении можно считать постоянной, эта доля площади принимается равной доле объема

мертвых зон, обозначаемой как $V_{\text{м.зон}}$.

Данный метод был применен для анализа шести промышленно распространенных типов ковшей: универсального (стандартного), увеличенной вместимости («типа корыто»), усиленного (тяжелого), скального (rock bucket), погрузочного (выгрузного) и узкого (траншейного). Результаты расчетов показали четкую зависимость между конструкцией ковша и объемом мертвых зон [16, 17]. Например, у универсального ковша доля мертвых зон составляет 0,18 (18%), в то время как у скального ковша с острым профилем она минимальна и равна всего 0,05 (5%). Наибольший объем мертвых зон (0,20 или 20%) наблюдается у усиленного ковша, что объясняется его массивной конструкцией и глубокими застойными зонами в углах. Полученные значения $V_{\text{м.зон}}$ являются количественной характеристикой, которая напрямую используется в последующей физико-эмпирической модели налипания.

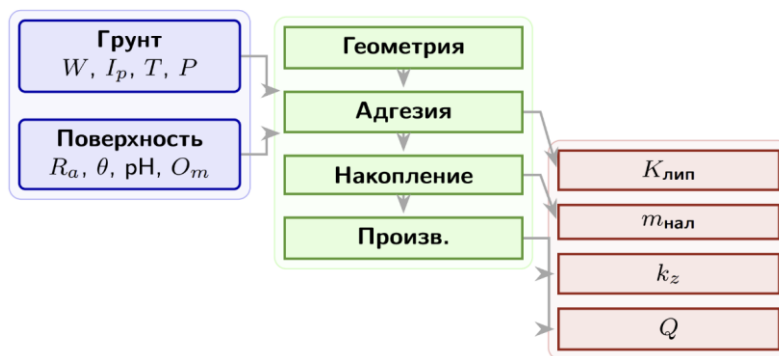


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчета липкости грунта и производительности экскаватора на основе физико-эмпирической модели

Fig. 3. Flow diagram of the algorithm for calculating soil stickiness and excavator performance based on a physico-empirical model

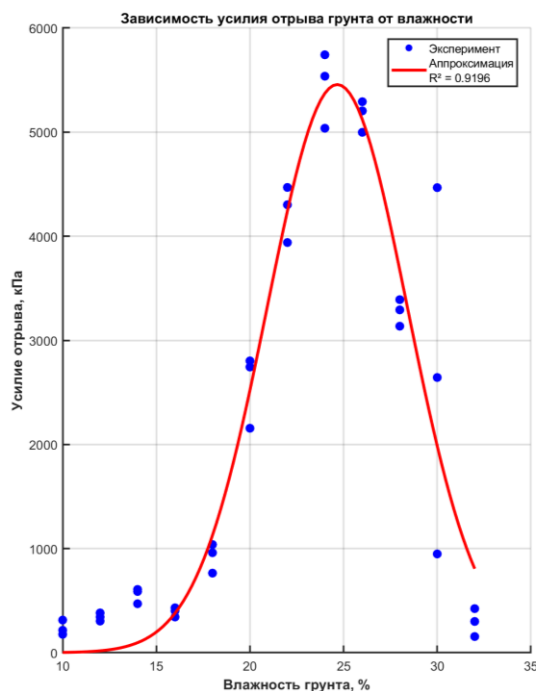


Рис. 4. Зависимость липкости грунта от влажности

Fig. 4. Soil adhesion vs. moisture content

Физико-эмпирическая модель динамики налипания

На основе данных, полученных на лабораторной установке, и результатов геометрического анализа была построена физико-эмпирическая модель, описывающая динамику налипания влагосодержащих грунтов (см. Рис. 3).

Первый фактор – зависимость липкости от влажности. Как показали многочисленные эксперименты, выполненные в филиале КузГТУ г. Прокопьевска на запатентованной установке по определению липкости, липкость связных грунтов имеет ярко выраженный максимум в узком диапазоне влажности [18, 19]. Экспериментальные исследования подтвердили, что для исследуемого грунта максимум липкости наблюдается при влажности 24–25%, что соответствует глинистым грунтам. При дальнейшем увеличении или уменьшении влажности липкость существенно снижается (Рис. 4).

Данная зависимость с высокой точностью аппроксимируется гауссовой (нормальной) функцией вида с коэффициентом детерминации $R^2=0,92$:

$$K_{\text{лип}}(W) = 5547 \cdot \exp\left(-\frac{(\omega - \omega_{\text{опт}})^2}{2 \cdot 4,8^2}\right), \quad (2)$$

где ω – текущая влажность грунта, %, $\omega_{\text{опт}}$ – оптимальная влажность для данного типа грунта.

Анализ графика (Рис. 4) показывает, что оптимальная влажность глинистых грунтов составляет $\omega_{\text{опт}}=24,3$ %.

Данные практики показывают, что максимальная доля объема, которая может быть занята

налипшим грунтом при «идеальных» для налипания (для нас неблагоприятных) условиях, составляет 35–37%.

На Рис. 5 можно увидеть, что распределение остатков (разницы между экспериментально полученными значениями липкости и значениями, рассчитанными по гауссовой модели) в зависимости от влажности грунта имеет определенную закономерность: при влажности 10–15% наблюдаются положительные остатки, что свидетельствует о занижении значений моделью; при влажности 17–24% преобладают отрицательные остатки, указывающие на завышение значений моделью; при влажности выше 25% остатки снова становятся положительными. При этом разброс остатков силы отрыва находится в пределах ± 500 кПа, что составляет около 10% от максимального значения липкости [19].

Второй фактор – влияние геометрии ковша. Он учитывается через два параметра, полученных на предыдущем этапе: долю мертвых зон $V_{\text{м.зон}}$ и коэффициент адгезии $k_{\text{адг}}$, который отражает дополнительные особенности конструкции, такие как наличие ребер жесткости, шероховатость поверхности и общая форма. Например, скальный ковш имеет повышенный коэффициент (1,20) из-за своей шероховатой поверхности, в то время как погружной ковш имеет пониженный коэффициент (0,80) благодаря гладким и пологим поверхностям [20, 21].

Наряду с влажностью критически важным параметром является число пластичности, которое

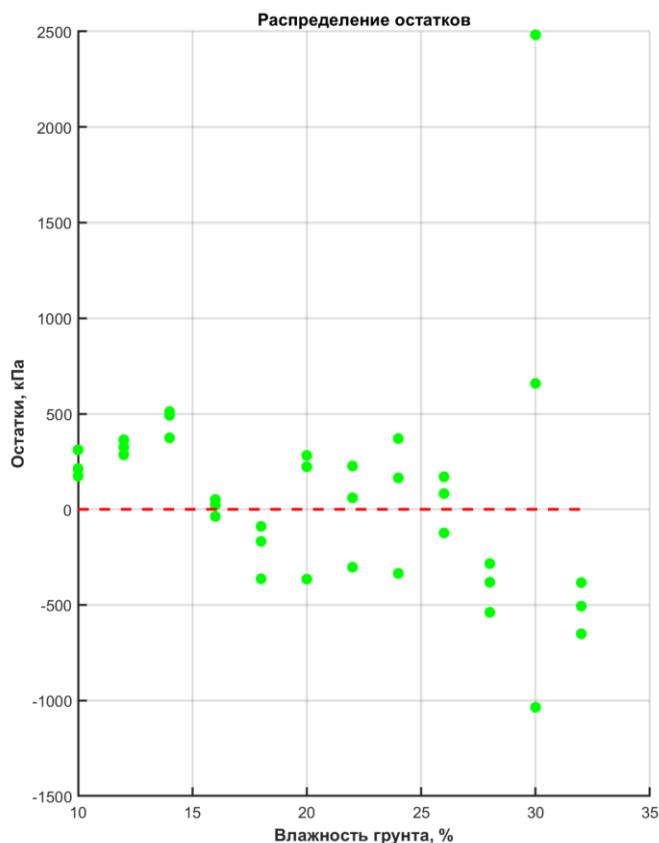


Рис. 5. Распределение остатков гауссовой аппроксимации
Fig. 5. Distribution of Gaussian approximation residuals

представляет собой разность между влажностью на границе текучести и влажностью на границе раскатывания и характеризует диапазон влажностей, в котором грунт сохраняет пластичное состояние [22]:

$$I_p = W_L - W_P \quad (3)$$

Этот параметр является интегральной характеристикой содержания глинистых частиц и их минералогического состава, так как грунты с высоким числом пластичности содержат значительное количество монтмориллонитовых и гидрослюдистых минералов, обладающих развитой удельной поверхностью и высокой способностью к набуханию. Такие грунты демонстрируют повышенную адгезию вследствие увеличения количества активных центров для образования водных мостиков, повышения вязкости водно-глинистой суспензии и усиления электрохимических взаимодействий между частицами. Влияние числа пластичности на липкость описывается линейной функцией нормированного отклонения:

$$f_{I_p} = 1 + \alpha_1 \cdot \frac{I_p - I_{p \text{ баз.}}}{I_{p \text{ баз.}}} \quad (4)$$

где $I_{p \text{ баз.}} = 12\%$ – базовое значение для пылеватого суглинка, а $\alpha_1 = 0,4 \dots 0,6$ – коэффициент чувствительности, который для глин может достигать 0,8, что означает существенное увеличение липкости при росте связности грунта.

Лабораторное определение границ пластичности осуществляется методом балансирного конуса для границы текучести, где грунт растирают с дистиллированной водой до тестообразной консистенции и погружают стандартный конус массой 76 г, фиксируя влажность при погружении на 10 мм. Существует метод раскатывания жгутиков для границы раскатывания, где пробу грунта раскатывают на стеклянной пластинке до получения жгутика диаметром 3 мм, при достижении которого жгутик начинает крошиться, и влажность образца в этот момент определяется весовым методом с точностью $\pm 1-2\%$ [22].

Температура окружающей среды и грунта влияет на липкость через несколько взаимосвязанных механизмов, среди которых первостепенное значение имеет изменение вязкости воды, которая снижается с ростом температуры по экспоненциальному закону:

$$\mu(T) = \mu_0 \cdot \exp[-\beta_\mu \cdot (T - T_0)], \quad (5)$$

где $\mu_0 = 1,0 \cdot 10^{-3}$ Па·с при $T_0 = 20$ °С, $\beta_\mu \approx 0,023$ °С⁻¹, что уменьшает сопротивление сдвигу водных пленок и ослабляет капиллярные силы.

Кроме того, происходит изменение поверхностного натяжения воды, которое линейно снижается с температурой:

$$\sigma(T) = \sigma_0 - \gamma_\sigma \cdot (T - T_0), \quad (6)$$

где $\sigma_0 = 0,072$ Н/м, $\gamma_\sigma \approx 0,00015$ Н/(м·°С), что приводит к уменьшению капиллярного давления согласно уравнению Лапласа, а также может проявляться эффект термического расширения, когда

различие коэффициентов теплового расширения грунта и металла изменяет контактное давление и площадь реального контакта. Влияние температуры на липкость описывается полиномиальной функцией:

$$f_T = 1 + \beta_T \cdot (T - T_0) + \gamma_T \cdot (T - T_0)^2, \quad (7)$$

где T – температура грунта, °С; $T_0 = 20$ °С – базовая температура; $\beta_T = -0,015 \dots -0,025$ °С⁻¹ – линейный коэффициент, отражающий снижение липкости при нагреве; $\gamma_T = 0,0001 \dots 0,0003$ °С⁻² – квадратичный коэффициент, учитывающий нелинейность процесса. При температуре 30°С липкость может снизиться на 20% по сравнению с базовым значением, однако важно отметить, что при температурах ниже 0°С модель требует модификации для учета фазового перехода воды в лед, который кардинально меняет механизм адгезии. Для измерения температуры используются контактные термометры, обеспечивающие точность $\pm 0,5$ °С при измерении температуры грунта в забое, или инфракрасные пирометры для бесконтактных измерений температуры поверхности ковша, что важно для оценки температурного градиента между грунтом и металлом, и для повышения достоверности рекомендуется проводить измерения в трех точках: в массиве грунта, на поверхности контакта и на рабочей поверхности ковша [23–25].

Контактное давление существенно влияет на процесс налипания через механизмы уплотнения контактного слоя, деформации водных пленок и активации пластических деформаций, так как при увеличении давления происходит переупаковка частиц грунта, уменьшение пористости и увеличение площади реального контакта с металлической поверхностью. Высокое давление может выдавливать воду из зоны контакта, что может как увеличивать адгезию за счет усиления молекулярных сил, так и уменьшать ее за счет разрушения капиллярных мостиков, а при давлениях, превышающих предел текучести грунта, происходит необратимая деформация, которая может «запечатывать» частицы на поверхности [26]. Влияние контактного давления описывается нелинейной функцией насыщения:

$$f_P = 1 - \exp(-\alpha_P \cdot P^{\beta_P}), \quad (8)$$

где P – контактное давление, кПа; $\alpha_P = 0,02 \dots 0,05$ кПа⁻¹ – коэффициент интенсивности; $\beta_P = 0,7 \dots 1,0$ – показатель нелинейности, и при давлении 50 кПа влияние может составлять около 71% от максимально возможного значения.

Определение контактного давления осуществляется экспериментальным методом с использованием тензометрических датчиков, встраиваемых в рабочую поверхность ковша, что позволяет регистрировать распределение давления в реальном времени, или расчетным методом на основе моделирования процесса черпания с использованием метода конечных элементов, где исходными данными служат геометрические параметры ковша, механические характеристики грунта и кинематика

рабочего оборудования, при этом типичные значения контактного давления при черпании суглинков составляют 20–80 кПа.

Шероховатость поверхности рабочего органа и краевой угол смачивания определяют гидрофильность или гидрофобность поверхности и влияют на адгезию через изменение реальной площади контакта и механическое зацепление частиц грунта [27]. Параметр шероховатости R_a характеризует микрорельеф поверхности, а краевой угол смачивания θ определяется согласно уравнению Юнга:

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{SG}}{\gamma_{LG}} - \gamma_{SL}, \quad (9)$$

где γ_{SG} , γ_{SL} , γ_{LG} – поверхностные энергии на границах твердое – газ, твердое – жидкость, жидкость – газ соответственно, причем для гидрофильных поверхностей вода растекается, увеличивая площадь контакта и усиливая капиллярные силы, а для гидрофобных поверхностей вода собирается в капли, уменьшая адгезию. Влияние шероховатости описывается логарифмической функцией:

$$f_{Ra} = 1 + \alpha_R \cdot \ln\left(\frac{R_a}{R_{абаз}}\right), \quad (10)$$

где $R_{абаз} = 2,5$ мкм – базовая шероховатость, а влияние краевого угла учитывается через функцию смачиваемости:

$$f_\theta = \frac{1 + \cos\theta}{2}, \quad (11)$$

это означает, что при переходе от стали с углом 60° к тефлону с углом 110° адгезия снижается более чем в два раза.

Лабораторные методы измерения включают профилометрию для определения R_a с использованием контактных или оптических профилометров с разрешением до 0,01 мкм и гониометрию для измерения краевого угла методом сидячей капли, где на

подготовленную поверхность наносится капля дистиллированной воды объемом 2–5 мкл, и угол измеряется по изображению с разрешением $0,1^\circ$, при этом для антиадгезионных покрытий рекомендуется контролировать оба параметра, так как они могут изменяться в процессе эксплуатации вследствие износа и загрязнения поверхности [28, 29].

Химические параметры грунта, такие как кислотность и содержание органических веществ, влияют на поверхностный заряд глинистых минералов и электростатические взаимодействия в системе грунт – вода – металл. При нейтральном pH большинство глинистых минералов имеют отрицательный поверхностный заряд, что способствует стабилизации дисперсной системы и умеренной адгезии. Однако при отклонении pH от нейтрального значения происходит следующее: в кислой среде происходит протонирование поверхностных групп и усиление адгезии; в щелочной среде усиливается диссоциация, и адгезия может снижаться. Органические вещества существенно увеличивают липкость грунтов за счет повышения вязкости поровой жидкости, образования полимерных мостиков между частицами и увеличения гидрофильности поверхности. Влияние кислотности описывается функцией:

$$f_{pH} = 1 + \alpha_{pH} \cdot |pH - 7|, \quad (12)$$

где $\alpha_{pH} = 0,05 \dots 0,1$, а влияние органики учитывается функцией:

$$f_{орг} = 1 + \alpha_{орг} \cdot O_m, \quad (13)$$

где O_m – содержание органики в долях единицы, а $\alpha_{орг} = 0,3 \dots 0,5$, что означает увеличение липкости на 2% при содержании органики 5%.

Определение pH выполняется потенциометри-

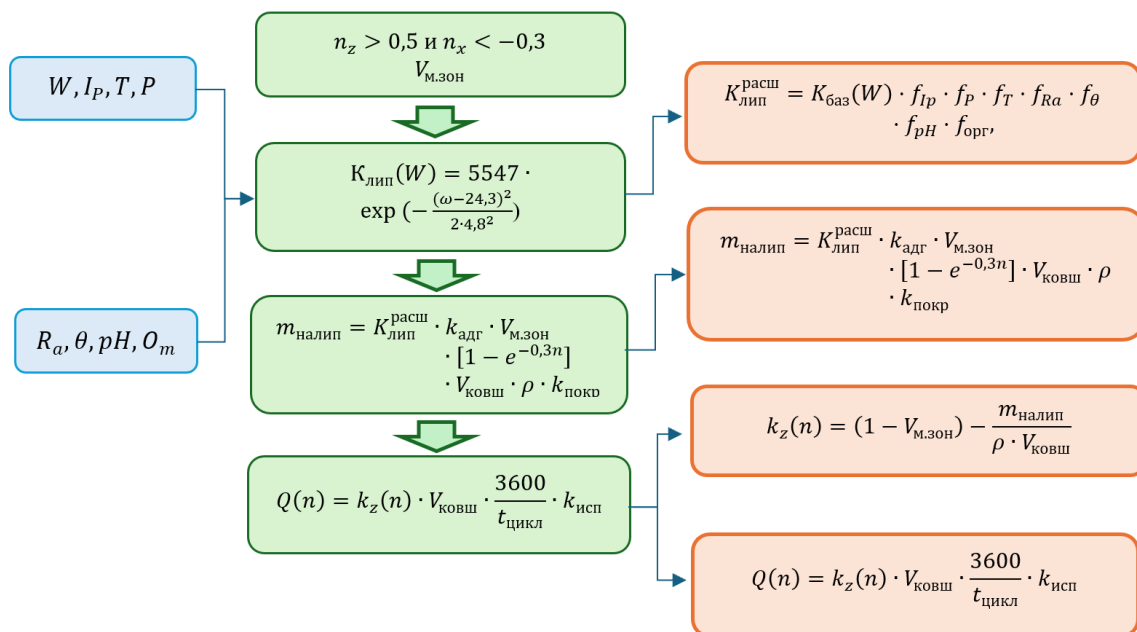


Рис. 6. Структурная схема взаимосвязи параметров адгезии и геометрических характеристик ковша
Fig. 6. Diagram of the relationship between the adhesion parameters and the geometric characteristics of the bucket

ческим методом с использованием стеклянного электрода и калибровкой по буферным растворам в водной вытяжке, а определение содержания органики осуществляется методом Тюрина или потерей при прокаливании с точностью $\pm 0,1-0,3\%$.

Результаты / Results

В настоящей работе предлагается комбинированная модель, способная расширить возможности оценки налипания на элементы ковша экскаватора.

Интеграция всех рассмотренных параметров в единую модель осуществляется через обобщенную формулу липкости, которая формируется как произведение базовой гауссовой зависимости и корректирующих коэффициентов [18]:

$$K_{\text{лип}}^{\text{расч}} = K_{\text{баз}}(W) \cdot f_{\text{ГР}} \cdot f_{\text{Р}} \cdot f_{\text{Т}} \cdot f_{\text{Ra}} \cdot f_{\theta} \cdot f_{\text{РН}} \cdot f_{\text{орг}}, \quad (14)$$

где каждый множитель имеет физическое обоснование и может быть определен экспериментально или рассчитан на основе справочных данных. Итоговая формула для расчета массы налипшего грунта после n рабочих циклов имеет вид:

$$m_{\text{налип}} = K_{\text{лип}}^{\text{расч}} \cdot k_{\text{адг}} \cdot V_{\text{м.зон}} \cdot [1 - e^{-0,3n}] \cdot V_{\text{ковш}} \cdot \rho \cdot k_{\text{покр}} \quad (15)$$

где $k_{\text{адг}}$ – коэффициент, учитывающий конструктивные особенности ковша; $V_{\text{м.зон}}$ – доля объема мертвых зон, рассчитанная методом анализа нормалей на основе трехмерной CAD – модели ковша, где мертвыми зонами считаются области с нормалью $n_z > 0,5$ и $n_x < -0,3$; $V_{\text{ковш}}$ – геометрический объем ковша, м^3 ; $\rho = 1,8 \text{ т/м}^3$ – плотность влажного суглинка; $k_{\text{покр}}$ – коэффициент эффективности антиадгезионного покрытия. На основе рассчитанной массы налипшего грунта определяется коэффициент наполнения ковша:

$$k_z(n) = (1 - V_{\text{м.зон}}) - \frac{m_{\text{налип}}}{\rho \cdot V_{\text{ковш}}} \quad (16)$$

Структурная схема интегрированной физико-эмпирической модели, базирующаяся на ряде зависимостей и положений (1, 2, 14 – 16), включающая учет объемов «мертвых зон», приведена на Рис. 6.

Расчет часовой производительности экскаватора в условиях эксплуатации с учетом предлагаемого коэффициента наполнения ковша (16), учитывающего налипание горной массы, следует определять по формуле:

$$Q(n) = k_z(n) \cdot V_{\text{ковш}} \cdot \frac{3600}{t_{\text{цикл}}} \cdot k_{\text{исп}} \quad (17)$$

где $t_{\text{цикл}} = 20 - 35 \text{ с.}$ – стандартная длительность цикла, а $k_{\text{исп}} = 0,7 \dots 0,9$ – коэффициент использования по времени.

Обсуждения / Discussion

Анализ описываемых моделей позволил выявить ряд ограничений: множество исследований проводилось на конкретных грунтах и требуют адаптации под породы, разрабатываемые в Кузбассе; не всегда можно объяснить природу появления чисто эмпирических коэффициентов; численные модели плохо справляются с одновременным моделированием многофазной среды (твердые частицы, вода, воздух), а также не могут адекватно отразить

нелинейное изменение липкости при отделении (отжим) влаги при быстром внедрении ковша.

Практическая реализация предлагаемой модели также требует проведения процедуры калибровки, которая включает отбор и лабораторный анализ проб грунта по всем восьми параметрам, проведение серии тестов на адгезию при варьировании влажности для уточнения параметров гауссовой функции, измерение геометрических параметров ковша и расчет доли мертвых зон методом анализа нормалей, а также калибровку модели по 10–15 экспериментальным точкам с использованием метода наименьших квадратов [30–32]. При корректной калибровке относительная погрешность прогноза массы налипшего грунта составляет $\pm 10-13\%$, что вполне достаточно для инженерных расчетов и принятия управленческих решений, хотя основные источники неопределенности включают естественную неоднородность грунта в забое, динамические эффекты при черпании, не учитываемые в квазистатической модели, и износ антиадгезионных покрытий в процессе эксплуатации.

Разработанная модель может быть интегрирована в системы цифровых моделей и цифровых двойников землеройной техники [33 – 35] для оперативного прогнозирования потерь производительности, оптимизации графиков технического обслуживания и очистки ковшей, обоснования выбора типа ковша и антиадгезионного покрытия для конкретных горно-геологических условий. В дальнейшем модель позволит провести экономическую оценку эффективности профилактических мероприятий.

Таким образом, представленная расширенная физико-эмпирическая модель налипания грунта систематически учитывает восемь ключевых параметров, влияющих на адгезию связных грунтов к рабочим поверхностям, при этом для каждого параметра приведено физическое обоснование, математическое описание и методика лабораторного определения, что позволяет обеспечить возможность оптимизации режимов работы экскаваторов, обоснования интервалов очистки рабочего органа и выбора эффективных антиадгезионных решений. Дальнейшее развитие модели сможет включать учет динамических эффектов при черпании, влияние многокомпонентного состава грунта и разработку адаптивных алгоритмов для систем автоматического управления землеройной техникой.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые в модели оценки налипания грунтов учтен геометрический анализ «мертвых зон» ковша;

2. Разработан метод расчета «мертвых зон» ковша на основе анализа нормалей к поверхности ковша ($n_z > 0,5$ и $n_x < -0,3$) с адаптируемой функцией адгезионного взаимодействия, что обеспечивает переход от качественному описанию проблемы к количественному инженерному прогнозированию с точностью $\pm 10-13\%$ при калибровке по экспериментальным данным.

Интеграция всех факторов в единую расчетную схему (Рис. 6) обеспечивает возможность прогно-

зирования потерь производительности экскаватора в зависимости от изменяющихся условий эксплуатации. Модель демонстрирует высокую адаптивность: при наличии базовых данных о свойствах грунта и параметрах ковша она может быть быстро калибрована под конкретное месторождение, что делает ее применимой для широкого спектра угольных разрезов и карьеров.

В условиях угольных предприятий разработанная модель найдет применение в нескольких ключевых направлениях. Во-первых, она позволяет обоснованно выбирать тип ковша для вскрышных и добычных работ: для влажных пород с высокой липкостью предпочтительны ковши с минимальной долей «мертвых зон» (скальный тип, $V_{м.зон} \approx 0,05$) и антиадгезионными покрытиями ($k_{покр} = 0,3 \dots 0,5$), что снижает потери производительности на 15–25%. Во-вторых, модель обеспечивает прогнозирование почасовой выработки экскаватора в зависимости от текущей влажности забойной массы, что критически важно для оперативного планирования отгрузок и работы транспортных систем. В-третьих, расчет оптимальных интервалов очистки рабочего органа на основе динамики накопления налипшего грунта позволяет минимизировать простой техники и повысить коэффициент использования по времени до 0,85–0,90.

Особую ценность модель представляет для предприятий, разрабатывающих месторождения с неоднородным гранулометрическим составом и переменными гидрогеологическими условиями. Возможность оперативной корректировки параметров модели на основе данных экспресс-анализа грунта позволяет адаптировать режимы работы экскаваторов к изменяющейся обстановке в забое, снижая влияние человеческого фактора на производительность.

Выводы / Conclusions

Проведенное исследование позволило разработать комбинированную физико-эмпирическую модель налипания влажных связных грунтов, систематически учитывающую восемь ключевых параметров взаимодействия. Комбинирование геометрического анализа «мертвых зон» ковша с адаптируемой функцией адгезионного взаимодействия обеспечивает переход к количественному инженерному прогнозированию с точностью ± 10 –13%.

Опытные данные по зависимости липкости (силы отрыва) грунтов от их влажности с высоким коэффициентом детерминации $R^2 = 0,92$ соответствуют нормальному (Гауссовому) распределению.

Максимальная сила отрыва (липкость) для пылеватых суглинков (на основе каолинистых глин, преобладающих в Кузбассе) достигается при влажности $\omega=24,3\%$.

Метод анализа нормалей позволяет обоснованно выбирать конструкцию рабочего органа для работы с глинистыми породами.

Внедрение разработанной модели на угольных предприятиях позволяет снизить потери производительности на 15–20% за счет рациональных режимов работы и технического сервиса (своевременной очистки, обновления футеровки). Модель

демонстрирует высокую адаптивность для различных месторождений.

Дальнейшие исследования направлены на верификацию модели, уточнение коэффициентов. Практическая реализация внедрения модели направлена на создание адаптивных систем автоматического управления работой экскаватора, корректирующих параметры черпания в реальном времени для минимизации налипания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Замышляев В. Ф., Грабский А. А., Кузиев Д. А., Абдуазизов Н. А. Сравнительный анализ результатов аналитических и экспериментальных исследований момента сопротивления вращению шнеко-фрезерного рабочего органа карьерного комбайна // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 11. С. 15–23. EDN IBXSYF.
2. Yong Fang, Bin Zhuo, Ruyue Zhang, Yubo Wang, Liupan Dou, Yuxiang Yao. Soil conditioning of clay based on interface adhesion mechanism: Microscopic simulation and laboratory experiment // Underground Space. 2024. Vol. 18. Pp. 239-255. DOI: 10.1016/j.undsp.2023.12.007.
3. Gu H., Liu K. Influence of Soil Heterogeneity on the Contact Problems in Geotechnical Engineering // Applied Sciences. 2021. № 11(9). Art. 4240. DOI: 10.3390/app11094240.
4. Yuan M., Zhang Z., Li H., Wang Z., Jin D. Study on Adhesion Characteristics of Rubber–Soil Interface Based on Electric Double-Layer and Water Film Theories // Coatings. 2025. № 15(4). Art. 375. DOI: 10.3390/coatings15040375.
5. O'Sullivan C. Particulate Discrete Element Modelling: A Geomechanics Perspective // CRC Press. London. 2011. P. 576. DOI: 10.1201/9781482266498.
6. Coetzee C. J. Review: Calibration of the Discrete Element Method // Powder Technology. 2017. № 310. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.01.015.
7. Протосеня А. Г., Беляков Н. А., Буслова М. А. Моделирование напряженно-деформированного состояния блочного горного массива рудных месторождений при отработке системами разработки с обрушением // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 619–627. EDN EGDXXM.
8. 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.
9. Xu J., Yoon H.-S. A review on mechanical and hydraulic system modeling of excavator manipulator system // Journal of construction engineering. 2016. Vol. 3. P. 1–11. DOI: 10.1155/2016/9409370.
10. Подэрни Р. Ю. Механическое оборудование карьеров. 6-е изд., перераб. и доп. М. : Изд. МГГУ, 2007. 680 с.
11. Мамаева М. С., Горюнов С. В., Хорешок А. А. Влияние свойств влагосодержащих грунтов на усилия сопротивления копанью ковшем экскавато-

ра тип «Обратная лопата» // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 2(172). С. 51–58. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-51-58. EDN NIXCZM.

12. 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 научнотехнической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 06–07 апреля 2023 года / Под общей редакцией Ю. А. Лагуновой. Оргкомитет: Ю. А. Лагунова, А. Е. Калянов. Екатеринбург : Уральский государственный горный университет, 2023. С. 69–75. EDN IOJKBA.

13. Носова Н. Ю., Глазунов В. А. Глава 3. Синтез, анализ и управление механизмами с тремя кинематическими цепями для аддитивных технологий // Новые механизмы в современной робототехнике. Москва : Рекламно-издательский центр «Техносфера», 2018. С. 89–120. EDN WRFFZI.

14. Поденок Л. П. Метод исследования морфологии поверхностей изломов на основе анализа нормалей // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Физика, математика, информатика. 2019. № 5(118). С. 47–50. EDN ABOAQY.

15. 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 томах, Минск, 24 мая – 10 июня 2022 года. Том 1. Минск : Белорусский национальный технический университет, 2022. С. 214–219. EDN NTYAJB.

16. Khoreshok A. A., Pudov E. Yu., Efremenkov A. B. To the question of organization of repair works of excavator buckets // AIP Conference Proceedings : IV International Scientific and Practical Conference on Innovations in Engineering and Technology (ISPCIEТ 2021). Vol. 2486. Veliky Novgorod, Russia : AIP Publishing, 2022. P. 040027. DOI: 10.1063/5.0106470. EDN KTWSZY.

17. Khoreshok A. A., Pudov E. Yu., Nozirezoda Sh. S. Features of design versions of adapter units and their influence on operational reliability of excavator bucket // AIP Conference Proceedings IV International Scientific and Practical Conference on Innovations in Engineering and Technology (ISPCIEТ 2021). Vol. 2486. Veliky Novgorod, Russia : AIP Publishing, 2022. P. 040012. DOI: 10.1063/5.0106467. EDN GYPMMV.

18. Патент на полезную модель № 222571 U1 Российской Федерации, МПК E21C 39/00, G01N 3/40. устройство для измерения прочности и липкости горных пород: № 2023131008: заявл. 28.11.2023: опубл. 09.01.2024 / Маметьев Л. Е., Бедарев Н. Т., Пудов Е. Ю. [и др.]; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский

государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева». EDN QSSKIZ.

19. Маметьев Л. Е., Любимов О. В., Кузнецов А. В. [и др.] Разработка устройства для измерения прочности и липкости горных пород в забое // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте: Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, Кемерово, 21–23 ноября 2023 года. Кемерово : Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, 2023. С. 396–400. EDN UWJHYF.

20. Андреева Л. И. Оценка ремонтной технологичности одноковшовых экскаваторов отечественного производства // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 3(173). С. 63–70. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-3-63-70. EDN ZOLNZR.

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. ГОСТ 25100-2020. Межгосударственный стандарт. Грунты. Классификация. Soils. Classification. Дата введения 2021-01-01.

23. Andreeva L., Abramov S. Methods of mining machine components reconditioning and hardening by means of concentrated energy fluxes // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2023. № 1. Pp. 7–15. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-1-7-15. EDN ODBBMV.

24. 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.

25. Khabbazi Basmenj A., Mirjavan A., Ghafoori M. [et al.] Assessment of the adhesion potential of kaolinite and montmorillonite using a pull-out test device // Bull. Eng. Geol. Environ. 2017. № 76. Pp. 1507–1519. DOI: 10.1007/s10064-016-0921-3.

26. Sebastiani D., Spagnoli G., Amici M. [et al.] Geotechnical characterization of natural clays for the prediction of clogging risk for TBM // Environ. Earth Sci. 2022. № 81. Art. 500. DOI: 10.1007/s12665-022-10630-3.

27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025692750 Российская Федерация. Определение параметров подвески ковша экскаватора-драглайна: заявл. 11.11.2025; опубл. 24.11.2025 / Брозовский С. Ю., Лагунова Ю. А., Шестаков В. С.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет». EDN BCOSGP.

28. Маслеников О. А., Комиссаров А. П., Лагунова Ю. А., Шестаков В. С. Разработка методики определения параметров универсального экскаватора // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 6(182). С. 10–15. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-10-15. EDN FYZJEN.

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

30. Шестаков В. С., Безкоровайный П. Г., Лагунова Ю. А. [и др.] Совершенствование рабочего оборудования карьерного гидравлического экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2025. № 12–1. С. 48–61. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_48. EDN HNMGSW.

31. Shestakov V., Babenkov P., Horoshavin S. Features of designing hydraulic excavator in APM Win-Machine // MATEC Web of Conferences : 2018 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2018, Vol. 224. Sevastopol : EDP Sciences, 2018. P. 02046. DOI: 10.1051/mateconf/201822402046. EDN EJUSKL.

32. Kuzin E., Gerike B. L., Mamaeva M., Singh K. Diagnostics of Gearboxes of Mining Belt Conveyors Using Floating Spectral Masks // E3S Web of Confer-

ences : IVth International Innovative Mining Symposium. EDP Sciences : EDP Sciences, 2019. P. 03011. DOI: 10.1051/e3sconf/201910503011. EDN YQFIFS.

33. Lagunova Y., Horoshavin S., Ivanov I. Perfection of constructive schemes of drive of running equipment of a career motor transport // MATEC Web of Conferences : 2018 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2018, Vol. 224. Sevastopol : EDP Sciences, 2018. P. 02031. DOI: 10.1051/mateconf/201822402031. EDN NCCQFM.

34. Кузин Е. Г. Предиктивное управление техническим состоянием горных транспортных машин // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 1(165). С. 41–49. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-1-41-49. EDN WPCNPB.

35. Зотов Б. Б., Рыжов И. М. Разработка цифровой модели постаментов дискового тормоза подъемной машины // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № S6. С. 179–185. EDN VTOBFT.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Мамаева Мария Сергеевна, старший преподаватель кафедры ИТМА, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевске (653033, Российская Федерация, Кемеровская область – Кузбасс, г. Прокопьевск, ул. Ноградская, 19а), e-mail: art@mmamaeva.ru

Хорешок Алексей Алексеевич, доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры горных машин и комплексов, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: haa.omit@kuzstu.ru

Кузин Евгений Геннадьевич, к.т.н., доцент, начальник отдела научно-технического развития, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевске (653033, Российская Федерация, Кемеровская область – Кузбасс, г. Прокопьевск, ул. Ноградская, 19а); ведущий научный сотрудник лаборатории техногенных процессов, Институт угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук (650000, Россия, Кемеровская область – Кузбасс, г. Кемерово, пр-т Ленинградский, 10), e-mail: kuzinevgen@gmail.com

Удалова Юлия Сергеевна, студент очного обучения группы МАб-231.2, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевске (653033, Российская Федерация, Кемеровская область – Кузбасс, г. Прокопьевск, ул. Ноградская, 19а)

Заявленный вклад авторов:

Мамаева Мария Сергеевна – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, формулировка терминов, разработка методологии, выводы, написание текста;

Хорешок Алексей Алексеевич – концептуализация исследования, разработка методологии, формулировка терминов, научный менеджмент, выводы;

Кузин Евгений Геннадьевич – научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, формулировка терминов, выводы, написание текста;

Удалова Юлия Сергеевна – обзор соответствующей литературы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Maria S. Mamaeva ¹, Alexey A. Khoreshok ², Evgeny G. Kuzin ^{1,3}, Yulia S. Udalova ¹¹ T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, branch in Prokopyevsk² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University³ Institute of Coal of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

* for correspondence: art@mmamaeva.ru

DEVELOPMENT PHYSICO-EMPIRICAL MODEL OF SOIL ADHESION TO EXCAVATOR BUCKET**Abstract.**

This article examines the pressing issue of increasing the productivity of hydraulic reverse shovel excavators by reducing the adhesion of moisture-containing soils. Excessive soil adhesion to the working parts of excavating machines, as well as to the bodies of dump trucks, is typical for most mining operations in the spring and autumn. This paper analyzes the literature and examines the limitations of existing methods for quantitatively assessing soil adhesion to the structural elements of earthmoving machines. A comprehensive approach to digitalizing the excavation process is proposed, integrating DEM modeling, kinematic analysis of working equipment based on the Denavit-Hartenberg formalism, and data from specialized measurement systems. A laboratory setup has been developed that reproduces the full dynamic "dig-lift-unload" cycle with simultaneous recording of the mass of adhering soil and its moisture content. A novel method for quantitatively assessing bucket "dead zones" is introduced, based on the analysis of surface normal vectors ($n_z > 0.5$, $n_x < -0.3$), enabling an informed choice of working element design (bucket type). An adaptive physical-empirical adhesion model is constructed, taking into account eight key factors: moisture content, plasticity index, temperature, contact pressure, roughness, contact angle, acidity, and organic content. A formula is proposed for calculating the hourly productivity of an excavator under operating conditions, taking into account the calculated bucket filling factor, which accounts for rock mass adhesion. Experimental data on the dependence of soil stickiness (tearaway force) on their moisture content are obtained, showing a high determination coefficient $R^2 = 0.92$ corresponding to a normal (Gaussian) distribution. It has been shown that the maximum tear-off force (tack) for silty loams (based on kaolinite clays, which are prevalent in Kuzbass) is achieved at a moisture content of $\omega = 24.3\%$. The proposed normal analysis method enables the informed selection of working tool designs for working with clayey rocks. Implementation of the developed model at coal mines allows for a 15–20% reduction in productivity losses through rational operating modes and maintenance (timely cleaning and lining renewal). The model demonstrates high adaptability to various deposits.

**Article info**

Received:

04 March 2026

Accepted for publication:

15 May 2026

Accepted:

15 June 2026

Keywords: hydraulic excavator, reverse shovel, wet loams, moisture-containing soils, soil adhesion, digitalization of the digging process, DEM modeling, kinematic model, Denavit-Hartenberg formalism, laboratory setup, physical-empirical model, determination of "dead zones"

For citation: Mamaeva M.S., Khoreshok A.A., Kuzin E.G., Udalova Yu.S. Development physico-empirical model of soil adhesion to excavator bucket. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2026; 3(185):105-118 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2026-3-105-118, EDN: NVFTPC

REFERENCES

1. Zamyshlyayev V.F., Grabskiy A.A., Kuziev D.A., Abduazizov N.A. Comparative Analysis of the Results of Analytical and Experimental Studies of the Moment of Rotational Resistance of the Auger-Milling Working Element of a Surface Miner. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2007; 11:15-23. EDN IBXSYF.

2. Yong Fang, Bin Zhuo, Ruyue Zhang, Yubo Wang, Liupan Dou, Yuxiang Yao. Soil conditioning of clay based on interface adhesion mechanism: Microscopic

simulation and laboratory experiment. *Underground Space*. 2024; 18:239-255. DOI: 10.1016/J.UNDSP.2023.12.007.

3. Gu H., Liu K. Influence of Soil Heterogeneity on the Contact Problems in Geotechnical Engineering. *Applied Sciences*. 2021; 11(9):4240. DOI: 10.3390/app11094240.

4. Yuan M., Zhang Z., Li H., Wang Z., Jin D. Study on Adhesion Characteristics of Rubber-Soil Interface Based on Electric Double-Layer and Water Film Theories.

Coatings. 2025; 15(4):375. DOI: 10.3390/coatings15040375.

5. O'Sullivan C. Particulate Discrete Element Modeling: A Geomechanics Perspective. *CRC Press*. London. 2011. P. 576. DOI: 10.1201/9781482266498.

6. Coetzee C. J. Review: Calibration of the Discrete Element Method. *Powder Technology*. 2017; 310. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.01.015.

7. Protosenya A.G., Belyakov N.A., Buslova M.A. Modeling the stress-strain state of a block rock mass of ore deposits during mining using caving systems. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2023; 262:619-627. EDN EGDXXM.

8. Mamaeva M.S., Kuzin E.G., Goryunov S.V., Khoreshok A.A. Analytical review of discrete element modeling models for loading and unloading processes of a hydraulic excavator bucket. *Mining Engineering and Technology*. 2025; 3(30):57-75. DOI: 10.26730/2618-7434-2025-3-57-75. EDN IDVPUW.

9. Xu J., Yoon H.-S. A review on mechanical and hydraulic system modeling of excavator manipulator system. *Journal of construction engineering*. 2016; 3:1-11. DOI: 10.1155/2016/9409370.

10. Poderni R.Yu. Mechanical equipment of quarries. 6th ed., revised and enlarged. Moscow: MGGU Publ.; 2007. 680 p.

11. Mamaeva M.S., Goryunov S.V., Khoreshok A.A. Influence of the properties of moisture-containing soils on the digging resistance forces of a reverse shovel excavator bucket. *Mining equipment and electromechanics*. 2024; 2(172):51-58. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-51-58. EDN NIXCZM.

12. 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 / Under the general editorship of Lagunova Yu.A. Organizing committee: Lagunova Yu.A., Kalyanov A.E. Yekaterinburg: Ural State Mining University; 2023. Pp. 69-75. EDN IOJKBA.

13. Nosova N.Yu., Glazunov V.A. Chapter 3. Synthesis, Analysis, and Control of Mechanisms with Three Kinematic Chains for Additive Technologies. *New Mechanisms in Modern Robotics*. Moscow: Advertising and Publishing Center "Technosfera"; 2018. Pp. 89-120. EDN WRFZL.

14. Podenok L.P. Method for Studying the Morphology of Fracture Surfaces Based on Normal Analysis. *Bulletin of Brest State Technical University. Series: Physics, Mathematics, Informatics*. 2019; 5(118):47-50. EDN ABOAQY.

15. Kravchenko A.L., Goncharko A.A., Kravchenko A.L., Drobyshevskaya 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, Minsk, May 24 – June 10, 2022. Vol. 1. Minsk: Belarusian National Technical University; 2022. Pp. 214-219. EDN NTYAJB.

16. Khoreshok A.A., Pudov E.Yu., Efremkov A.B. To the question of organization of repair works of excavator buckets. *AIP Conference Proceedings: IV International Scientific And Practical Conference On Innovations In Engineering And Technology (ISPCJET 2021)*. Vol. 2486.

Veliky Novgorod, Russia: AIP PUBLISHING; 2022. P. 040027. DOI: 10.1063/5.0106470. EDN KTWSZY

17. Khoreshok A.A., Pudov E.Yu., Nozirzoda Sh.S. Features of design versions of adapter units and their influence on operational reliability of excavator bucket. *AIP Conference Proceedings IV International Scientific And Practical Conference On Innovations In Engineering And Technology (ISPCJET 2021)*. Vol. 2486. Veliky Novgorod, Russia: AIP PUBLISHING; 2022. P. 040012. DOI: 10.1063/5.0106467. EDN GYPMMV.

18. Patent for Utility Model No. 222571 U1 Russian Federation, IPC E21C 39/00, G01N 3/40. Device for measuring the strength and stickiness of rocks: No. 2023131008: appl. 28.11.2023: publ. 09.01.2024 / Mametyev L.E., Bedarev N.T., Pudov E.Yu. [et al.]; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev". EDN QSSKIZ.

19. Mametyev L.E., Lyubimov O.V., Kuznetsov A.V. [et al.] Development of a device for measuring the strength and stickiness of rocks in a face. *Innovations in information technology, mechanical engineering and motor transport: Collection of materials of the VII International scientific and practical conference*. Kemerovo, November 21–23, 2023. Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbacheva; 2023. Pp. 396-400. EDN UWJHYF.

20. Andreeva L.I. Evaluation of reparability of domestically produced single-bucket excavators. *Mining equipment and electromechanics*. 2024; 3(173):63-70. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-3-63-70. EDN ZOLNZR.

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

22. GOST 25100-2020. Interstate standard. Soils. Classification. Soils. Classification. Date of introduction 2021-01-01.

23. Andreeva L., Abramov S. Methods of mining machine components reconditioning and hardening by means of concentrated energy fluxes. *News of higher educational institutions. Mining journal*. 2023; 1:7-15. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-1-7-15. EDN ODBBMV.

24. 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.

25. Khabbazi Basmenj A., Mirjavan A., Ghafoori M. [et al.] Assessment of the adhesion potential of kaolinite and montmorillonite using a pull-out test device. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2017; 76:1507-1519. DOI: 10.1007/s10064-016-0921-3.

26. Sebastiani D., Spagnoli G., Amici M. [et al.] Geotechnical characterization of natural clays for the prediction of clogging risk for TBM. *Environ. Earth Sci*. 2022; 81:500. DOI: 10.1007/s12665-022-10630-3.

27. Certificate of State Registration of Computer Program No. 2025692750 Russian Federation. Determination of Dragline Excavator Bucket Suspension Parameters: declared 11.11.2025: published 24.11.2025. Brozovsky S.Yu., Lagunova Yu.A., Shestakov V.S.; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ural State Mining University". EDN BCOSGP.

28. Maslenikov O.A., Komissarov A.P., Lagunova Yu.A., Shestakov V.S. Development of a Methodology for Determining the Parameters of a Universal Excavator. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2025; 6(182):10-15. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-10-15. EDN FYZJEN.

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

30. Shestakov V.S., Bezkorovayny P.G., Lagunova Yu.A. [et al.] Improving the working equipment of a quarry hydraulic excavator. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2025; 12-1:48-61. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_48. EDN HNMGSW.

31. Shestakov V., Babenkov P., Horoshavin S. Features of designing hydraulic excavator in APM Win-Machine. *MATEC Web of Conferences: 2018 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2018*. Vol. 224. Sevastopol: EDP Sciences; 2018. P. 02046. DOI: 10.1051/mateconf/201822402046. EDN EJUSKL.

32. Kuzin E., Gerike B.L., Mamaeva M., 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.

33. Lagunova Y., Horoshavin S., Ivanov I. Perfection of constructive schemes of drive of running equipment of a career motor transport. *MATEC Web of Conferences: 2018 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2018*. Vol. 224. Sevastopol: EDP Sciences; 2018. P. 02031. DOI: 10.1051/mateconf/201822402031. EDN NCCQFM.

34. Kuzin E.G. Predictive control of the technical condition of mining transport vehicles. *Mining equipment and electromechanics*. 2023; 1(165):41-49. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-1-41-49. EDN WPCNPB.

35. Zotov B.B., Ryzhov I.M. Development of a digital model of the pedestal of the disc brake of a lifting machine. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2014; S6:179-185. EDN VTOBFT.

© 2026 The Authors. 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:

Maria S. Mamaeva, Senior lecturer at the Department of ITMA, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, branch in Prokopyevsk (653033, Russian Federation, Kemerovo region - Kuzbass, Prokopyevsk, Nogradskaya str., 19a), e-mail: art@mmamaeva.ru

Alexey A. Khoreshok, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mining Machinery and Complexes, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russian Federation, Kemerovo, Vesennaya str., 28), e-mail: haa.omit@kuzstu.ru

Evgeny G. Kuzin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Scientific and Technical Development, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, branch in Prokopyevsk (653033, Russian Federation, Kemerovo region - Kuzbass, Prokopyevsk, Nogradskaya str., 19a); leading researcher Employee of the Laboratory of Technogenic Processes, Institute of Coal of the Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (650000, Russia, Kemerovo region – Kuzbass, Kemerovo, Leningradsky ave., 10), e-mail: kuzinevgen@gmail.com

Yulia S. Udalova, full-time student of the MAb-231.2 group, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, branch in Prokopyevsk (653033, Russian Federation, Kemerovo region – Kuzbass, Prokopyevsk, Nogradskaya str., 19a)

Contribution of the authors:

Maria S. Mamaeva– formulation of a research task, scientific management, review of relevant literature, conceptualization of research, formulation of terms, development of methodology, conclusions, writing the text;

Alexey A. Khoreshok– conceptualization of research, development of methodology, formulation of terms, scientific management, conclusions;

Evgeny G. Kuzin– scientific management, review of relevant literature, conceptualization of research, formulation of terms, conclusions, writing the text;

Yulia S. Udalova– review of relevant literature, writing the text.

Authors have read and approved the final manuscript.

