ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.3.02:620.178
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-4-14

Комбинированное моделирование абразивного износа рабочих органов почвообрабатывающих машин методом дискретных и конечных элементов

***С.Г. Мударисов*[1]✉, *И.М. Фархутдинов*[2], *А.Ф. Фаюршин*[3], *В.Х. Имангулов*[4]**

[1, 2, 3, 4] Башкирский государственный аграрный университет; г. Уфа, Россия

[1] salavam@gmail.com✉; https://orcid.org/0000-0001-9344-2606

[2] ildar1702@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-6443-8584

[3] azamatff@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-8787-8750

[4] imangulov.vener@mail.ru; https://orcid.org/0009-0000-9171-2369

Аннотация. Рабочие органы почвообрабатывающих машин в процессе эксплуатации подвержены абразивному износу. Для детального изучения процессов износа рабочих органов можно использовать методы моделирования. Исследования проведены с целью разработки и верификации модели абразивного износа фрагмента рабочего органа почвообрабатывающей машины в лабораторной установке сухого резино-песчаного истирания с использованием метода дискретных элементов (DEM) и метода конечных элементов (FEM). Моделирование абразивного износа с применением гибридного подхода выполнили в среде ANSYS Workbench и Rocky DEM: частицы песка (сфера, 0,25 мм) описали DEM с контактной моделью гистерезисной линейной пружины, для стального образца и резинового колеса применили FEM с тетраэдрической сеткой (0,5 и 1,0 мм). Реализовали закон износа Арчарда с масштабированием пути скольжения в 1000 раз. Численное моделирование абразивного износа, проведенное при нагрузках на испытуемую деталь со стороны резинового колеса 17…100 Н, показало увеличение объемного износа по степенному закону $V_m \approx 1{,}22N^{1{,}2}$. При нагрузке 100 Н за 7 с модельного расчета достигнут максимальный износ 328,5 мм^3. Определили три стадии износа: приработка (менее 30 Н), установившийся процесс (более 50 Н), ускоренное разрушение (более 85 Н). При нагрузках более 50 Н формируется W-образное распределение интенсивности износа с двумя боковыми максимумами по причине деформации резинового обода. Гибридный FEM-DEM подход по сравнению с мономоделью DEM повысил точность прогноза на 15…20%. Впервые получены количественные закономерности трансформации пятна интенсивности износа с ростом нагрузки для резино-песчаной установки; обоснованы пороговые значения контактного давления для стали 45. Разработанную модель рекомендуем применять для оптимизации режимов работы почвообрабатывающих орудий. Для песчаных почв с абразивными включениями предельная нагрузка на 1 мм режущей кромки не должна превышать 50 Н, что соответствует скорости движения 8…9 км/ч.

Ключевые слова: износ; нагрузка; закон износа Арчарда; метод дискретных элементов; метод конечных элементов; Rocky DEM; ANSYS; моделирование; моделирование абразивного износа

Для цитирования: Мударисов С.Г., Фархутдинов И.М., Фаюршин А.Ф., Имангулов В.Х. Комбинированное моделирование абразивного износа рабочих органов почвообрабатывающих машин методом дискретных и конечных элементов // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 5. С. 4-14. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-4-14

© Мударисов С.Г., Фархутдинов И.М., Фаюршин А.Ф., Имангулов В.Х., 2026

ORIGINAL ARTICLE

Combined discrete-finite element modeling of abrasive wear in tillage tool elements

***S.G. Mudarisov*[1]✉, *I.M. Farkhutdinov*[3], *A.F. Fayurshin*[3], *V.Kh. Imangulov*[4]**

[1, 2, 3, 4] Bashkir State Agrarian University; Ufa, Russia

[1] salavam@gmail.com✉; https://orcid.org/0000-0001-9344-2606

[2] ildar1702@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-6443-8584

[3] azamatff@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-8787-8750

[4] imangulov.vener@mail.ru; https://orcid.org/0009-0000-9171-2369

Abstract. The soil-engaging parts of tillage machinery are highly susceptible to intensive abrasive wear during field operations. Numerical modeling is an effective approach for conducting detailed studies of these wear processes. To this end, a numerical model of abrasive wear for a section of a tillage tool element was developed and validated against experimental data from a laboratory dry rubber-wheel (sand-abrasion) test installation. The simulation framework employs a combined discrete element method (DEM) and finite element method (FEM) approach. Co-simulations were performed using ANSYS Workbench and Rocky DEM: the abrasive sand particles (spherical, 0.25 mm in diameter) were modeled via DEM using a linear hysteretic spring contact model, while the steel specimen and the rubber wheel were discretized via FEM using a tetrahedral mesh with element sizes of 0.5 mm and 1.0 mm, respectively. Archard's wear law, integrated with a wear-path scaling factor ($\alpha = 1000$) to accelerate computation, was implemented. Numerical experiments were conducted under normal loads ranging from 17 to 100 N. The results demonstrate that the volumetric wear increases according to a power law: $V_m \approx 1{,}22N^{1,2}$. Under a load of 100 N, the wear volume reached 328.5 mm^3 within a 7-second interval. Three distinct wear stages were identified: running-in, steady-state wear, and accelerated wear at loads of 85 N and above. At loads exceeding 50 N, a characteristic W-shaped wear-intensity distribution with two lateral maxima emerged due to the elastic deformation of the rubber wheel rim. The hybrid FEM-DEM approach improves wear prediction accuracy by 15-20% compared to standalone DEM simulations. For the first time, quantitative patterns governing the transformation of the wear-intensity field under increasing loads were established for a rubber-sand abrasive environment, and critical contact pressure thresholds for Grade 45 steel were determined. The developed model is highly recommended for optimizing the design and operating parameters of tillage implements. For operations in sandy soils containing highly abrasive inclusions, the maximum linear load along the cutting edge should not exceed 50 N/mm, which corresponds to an operating speed of 8-9 km/h.

Keywords: wear; load; Archard's wear law; discrete element method; finite element method; Rocky DEM; ANSYS Workbench; modeling; abrasive wear modeling

For citation: Mudarisov S.G., Farkhutdinov I.M., Fayurshin A.F., Imangulov V.Kh. Combined discrete-finite element modeling of abrasive wear in tillage tool elements. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2026;28(5):4-14. (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-4-14

Введение

Износ рабочих органов почвообрабатывающих машин (ПОМ) представляет собой одну из основных проблем в сельскохозяйственном машиностроении и агроинженерии. Износ приводит к значительным экономическим потерям, связанным с затратами на замену рабочих органов, увеличением тягового усилия, ростом расхода топлива и снижением качества обработки почвы. По данным отечественных исследований [1], до 80…90% стоимости ремонта почвообрабатывающих орудий составляют расходы на запасные части. Ресурс серийно выпускаемых культиваторных лап составляет 7…18 га на одну деталь, дисковых борон – 8…30 га на один диск [1]. При затуплении лезвий рабочих органов повышается удельная нагрузка на сельскохозяйственную машину и, как следствие, увеличивается расход топлива.

Как отмечают A. Yazici [2] и D. Singh et al. [3], изношенные лезвия плугов и культиваторов не обеспечивают должного подрезания пласта, что способствует образованию уплотненной «плужной подошвы», ухудшает агротехнические показатели и приводит к снижению урожайности [4]. Неравномерный износ лемеха является следствием соответствующего неравномерного распределения давления почвы, зависящего от ее типа и физико-механической характеристики, что напрямую влияет на качество вспашки и энергозатраты [5].

Согласно оценкам Karamis [6] в Турции при двукратной обработке 13,4 млн га теряется около 9700 т

стали, что в энергетическом эквиваленте составляет 897 ГДж. В России на песчаных почвах с каменистыми включениями потери массы лемеха могут достигать 260…450 г/га, на глинистых почвах этот показатель составляет лишь 2…30 г/га. Кроме того, как подчеркивают P. Kostencki и др. [7], попадание в почву продуктов износа, содержащих такие элементы, как Co, Cr, Cu, Mn, Ni, может создавать токсикологическую угрозу для окружающей среды. Таким образом, изучение механизмов износа и влияющих на него факторов, а также разработка методов повышения износостойкости являются критически важными задачами для повышения эффективности и устойчивости сельскохозяйственного производства.

По оценкам специалистов, расходы на замену деталей вследствие износа составляют примерно 40% от всех затрат на замену компонентов почвообрабатывающей техники [8]. Кроме того, потери, связанные с износом и трением в сельском хозяйстве и горнодобывающей промышленности, составляют около 2,7% от общего ежегодного мирового объема выбросов CO_2 [9].

Несмотря на значительный прогресс в области исследования износа ПОМ, ряд проблем остается нерешенным. Во многих исследованиях акцент делается на измерении потери материала, а не на глубинном анализе доминирующих механизмов износа и типов контакта с помощью микроструктурного анализа.

Интенсивность износа рабочих органов зависит от множества факторов – таких, как тип и состав почвы, влажность, степень уплотнения, механические свойства материала рабочих органов, геометрия инструмента, а также параметры режима работы машины (глубина обработки, скорость движения) [10-12]. Научное понимание механизмов износа и разработка методов его прогнозирования являются критически важными для оптимизации конструкции рабочих органов, выбора материалов и технологий упрочнения поверхностей.

В последнее десятилетие наблюдается существенное развитие методов теоретического описания процессов износа. Исследователи все более активно применяют численное моделирование (метод дискретных элементов DEM, метод конечных элементов FEM, вычислительная гидродинамика CFD) в сочетании с экспериментальными методами для разработки прогностических моделей [13-15].

Наиболее перспективным для моделирования процесса износа рабочих органов ПОМ является метод дискретных элементов. Основными преимуществами DEM являются возможность моделирования взаимодействия отдельных частиц почвы с рабочим органом, вычисление контактных напряжений и скорости скольжения в каждой точке контакта, а также выявление локализованных зон максимального давления [16-18]. А при интегрировании в DEM-модель процесса обработки почвы закона износа Арчарда можно моделировать и процесс износа рабочих органов ПОМ. Однако отметим, что использование только метода дискретных элементов не позволяет получить полноценную картину износа. DEM дает возможность оценить динамические параметры взаимодействия: например, контактные силы, скорость частиц, траекторию их движения, а также локализацию зон повышенного давления. Вместе с тем для количественного определения параметров износа (весовых и объемных характеристик удаленного материала, локальной скорости изнашивания, эволюции геометрии поверхности и перераспределения контактных напряжений в твердом теле) DEM-моделирования недостаточно. Это связано с тем, что метод дискретных элементов не учитывает напряженно-деформированного состояния изнашиваемой детали, упругих деформаций контактирующих тел и связанного с ними изменения фактической площади контакта. Поэтому для достоверного прогнозирования абразивного износа рабочих органов почвообрабатывающих машин необходимо сочетать метод дискретных элементов (DEM) и метод конечных элементов (FEM).

Гибридный подход дает возможность получить как динамические характеристики взаимодействия, так и количественные показатели износа (массу, объем, скорость изнашивания, форму изношенной поверхности), что необходимо для оптимизации конструкции и режимов работы почвообрабатывающих орудий.

Цель исследований: разработка и верификация комбинированной DEM-FEM-модели абразивного износа фрагмента рабочего органа почвообрабатывающей машины в лабораторной установке сухого резино-песчаного истирания для количественного прогнозирования объемного износа, скорости изнашивания и эволюции поверхности при различных нагрузках.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Обосновать параметры контактной модели метода дискретных элементов для моделирования процесса износа рабочих органов ПОМ.

2. Разработать гибридную модель процесса износа детали в лабораторной установке сухого абразивного истирания.

3. Провести численные эксперименты при различных нагрузках и выявить закономерности объемного износа, интенсивность износа, распределение контактных напряжений и эволюцию пятна износа во времени.

Материалы и методы

Базовой моделью для теоретического описания объема абразивного износа является закон Арчарда [10]:

$$V = k\frac{N \cdot L}{H}, \quad (1)$$

где V – объем износа, мм^3; k – безразмерная константа износа (коэффициент износа); N – нормальная нагрузка, Н; L – расстояние скольжения, м; H – твердость более мягкого материала, Па или НВ.

Для применения закона Арчарда к условиям обработки почвы, когда нагрузки распределены по контактной поверхности и изменяются во времени, используется модифицированная форма, в которой объем износа зависит от контактного давления и относительной скорости скольжения [11]:

$$\frac{dV}{dt} = k \cdot p(t) \cdot V(t), \quad (2)$$

где $p(t)$ – контактное давление в момент времени t, Па; $V(t)$ – относительная скорость скольжения, м/с.

Согласно закону Арчарада (1) коэффициент износа

$$k = \frac{V \cdot H}{N \cdot L} \quad (3)$$

обратно пропорционально зависит от расстояния скольжения L, что в свою очередь в полевых условиях равняется пути рабочего органа в почве.

Прямое использование реального пути L в моделировании приводило бы к чрезмерно длительным расчетам, невозможным на имеющихся вычислительных ресурсах. Поэтому согласно [12] применяется усиленный коэффициент износа k_m, увеличенный на коэффициент масштабирования пути:

$$k_m = k \cdot \alpha, \quad (4)$$

где $\alpha = L/L_m$ – отношение реального пути скольжения L к модельному L_m.

Тогда объемный износ по закону Арчарда в модели рассчитывался как

$$V_m = k_m\frac{N \cdot L}{H}. \quad (5)$$

В модели нами принят коэффициент увеличения $\alpha = 1000$, что позволяет сократить путь скольжения в 1000 раз при сохранении соответствия реальному объему износа.

Согласно данным исследования [12] коэффициент износа $k = 1$. Тогда с учетом коэффициента увеличения масштабирования пути согласно (4) усиленный коэффициент износа $k_м = 1000$.

Основным ограничением использования закона Арчарда является определение коэффициента износа k, который зависит от материалов в контакте, почвенных условий, температуры и других факторов. Экспериментальное определение k обычно проводится с использованием стандартных тестов – таких, как испытание абразивного износа в сухом песко-резиновом аппарате типа ASTM G65 [11]. Данный аппарат состоит из стального колеса с резиновой шиной (диаметром 220 мм и шириной 12 мм), к которому прижимается образец с помощью рычажного механизма.

Для моделирования абразивного износа в лабораторной установке (ASTM G65) предлагаем гибридный подход, сочетающий метод дискретных элементов (DEM) для моделирования сыпучей среды и метод конечных элементов (FEM) для описания напряженно-деформированного состояния испытуемого образца и резинового колеса, реализации закона износа Арчарда на поверхности и отслеживания потери объема. Данная схема позволяет учитывать не только дискретное взаимодействие частиц абразива с поверхностью, но и перераспределение контактных давлений вследствие локальной деформации контактирующих тел.

Реализация гибридного моделирования выполнена в интегрированной среде ANSYS Workbench совместно с модулем Rocky DEM (интеграция через интерфейс «Coupling»). Процесс включал в себя четыре этапа:

1. Построение конечно-элементных моделей

Образец *1* размерами 24 × 50 × 10 мм и колесо *2* с резиновым ободом (диаметр – 220 мм, ширина – 12 мм) были импортированы из КОМПАС 3D в ANSYS Mechanical (рис. 1). Для каждого тела построена тетраэдрическая сетка *3* с размерами элементов: для образца – 0,5 мм, для колеса – 1,0 мм (рис. 2). Материал образца – сталь 45 (модуль Юнга $2{,}1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона 0,3), резина – гиперупругая модель Муни-Ривлина (C_{10} = 0,35 МПа, C_{01} = 0,10 МПа, несжимаемость).

2. Генерация дискретной фазы в Rocky DEM

Частицы песка *1* (сферическая форма, диаметр – 0,25 мм, насыпная плотность – 1600 кг/м^3)

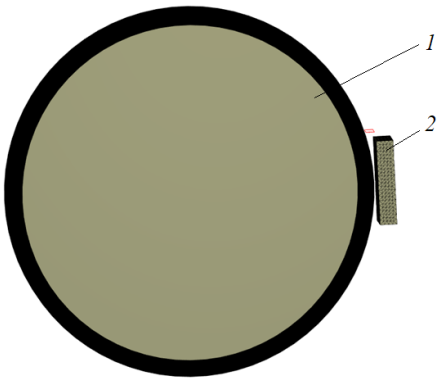


Рис. 1. Трехмерная модель аппарата абразивного износа:
1 – образец; 2 – колесо с резиновым ободом

Fig. 1. Three-dimensional model of the abrasive wear unit:
1 – sample; 2 – wheel with a rubber rim

генерировались через входное отверстие *2* с заданной скоростью подачи 0,5 г/с (рис. 2). В качестве контактной модели для взаимодействий «Частица-частица» и «Частица-стенка» согласно [12] выбрана модель гистерезисной линейной пружины (Hysteretic Linear Spring) с параметрами, представленными в таблице 1.

3. Совместный расчет (Coupling)

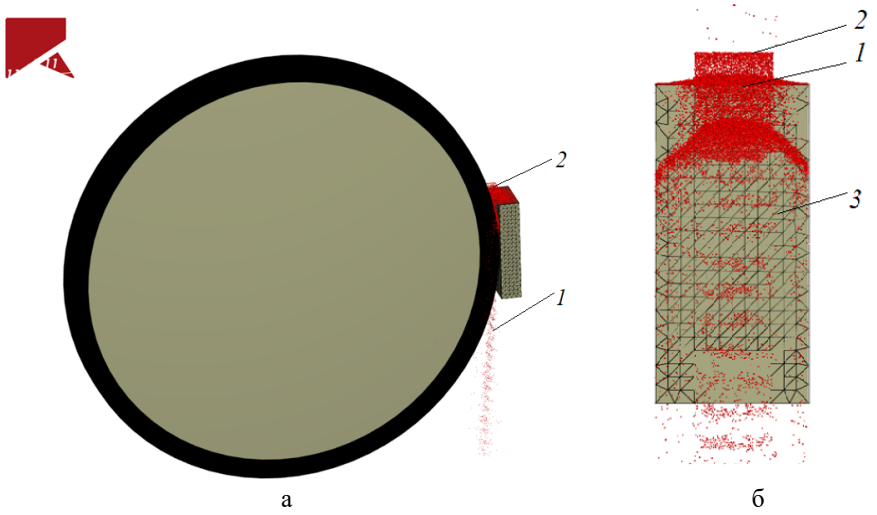
На каждом временном шаге ($\Delta t = 1 \cdot 10^{-6}$ с) Rocky DEM передает в ANSYS силы контакта от частиц на поверхность образца и колеса. ANSYS в свою очередь вычисляет поле упругих перемещений и уточняет геометрию контактной области для следующего шага. Обмен данными осуществляется через поверхностные интерфейсные узлы. Такой подход позволяет моделировать не только износ по Арчарду, но и его влияние на перераспределение напряжений (например, образование локальных зон концентрации на кромках изношенной поверхности).

4. Реализация закона износа в FEM-DEM модели

При комбинированном моделировании износа методом дискретных элементов, согласно алгоритму их взаимодействия [12], для каждого контактного узла на поверхности образца вычисляется тангенциальная работа трения за шаг ($\Delta E_{\tau,i}$):

$$\Delta E_{\tau,i} = \sum (F_{\tau,i} \cdot \Delta s_i), \quad (6)$$

где $F_{\tau,i}$ – сила трения в узле; Δs_i – относительное смещение.



а б

Рис. 2. Моделирование процесса абразивного износа в программе Rocky DEM:
1 – частицы песка; 2 – входное отверстие; 3 – тетраэдрическая сетка

Fig. 2. Simulation of the abrasive wear process in Rocky DEM:
1 – sand particles; 2 – inlet opening; 3 – tetrahedral mesh

Таблица 1

Параметры контактной модели гистерезисной линейной пружины

Table 1

Parameters of the contact model of a hysteretic linear spring

Свойства материала	Параметры контактной модели		
	Песок	**Образец**	**Резина (колесо)**
Насыпная плотность, кг · м$^{-3}$	1600	–	–
Плотность, кг · м$^{-3}$	2660	7850	1600
Модуль упругости в объеме, МПа	100	–	–
Модуль Юнга, МПа	–	2,1× 10^5	300
Коэффициент Пуассона	0,3	0,3	0,4
Размер частиц, мм	0,25	–	–
Свойства взаимодействия материалов	**Песок-песок**	**Сталь-песок**	**Резина-песок**
Коэффициент статического трения	0,7	0,3	0,3
Коэффициент динамического трения	0,7		
Коэффициент тангенциальной жесткости	1	0,25	0,25
Коэффициент восстановления	0,3	0,3	0,3

Потеря объема в результате абразивного износа в модели определяется как смещение вершин треугольной поверхности тетраэдров внутрь (рис. 2). Расстояние, на которое смещается каждая вершина, рассчитывается таким образом, чтобы изменение объема ΔV равнялось потере объема в результате износа, рассчитанной по закону износа Арчарда (1). Тогда потеря объема в результате износа за временной шаг моделирования будет определяться как

$$\Delta V_i = \frac{k}{H} \cdot \Delta E_{\tau,i}. \quad (7)$$

Затем вершины тетраэдров смещаются нормально внутрь на величину $\delta = \Delta V_i / A_i$ (где A_i – эффективная площадь, приходящаяся на узел). Коэффициент масштабирования пути $\alpha = 1000$ применялся аналогично мономодели DEM.

Гибридная методика позволяет одновременно оценивать износ, эволюцию поля контактных напряжений, а также учитывать влияние упругой деформации резинового колеса на кинематику частиц абразива.

Моделирование и постобработку результатов производили на компьютере с процессором Intel Core i5-16400KF (3,5 ГГц) и 64 ГБ ОЗУ.

Моделирование процесса абразивного износа проводили при нагрузках на испытуемую деталь со стороны резинового колеса N = 17, 34, 51, 68, 85 и 100 Н. Общее время расчета для каждого случая составляло 7 с. Высыпание абразивного песка между деталью и колесом инициировалось до установления их контакта, что обеспечивало в расчетах учет контактного взаимодействия «Колесо-песок-деталь».

Результаты и их обсуждение

Результаты визуализации интенсивности износа (W, Вт/м^2) исследуемого образца при различной нагрузке на деталь со стороны колеса представлены на рисунке 3.

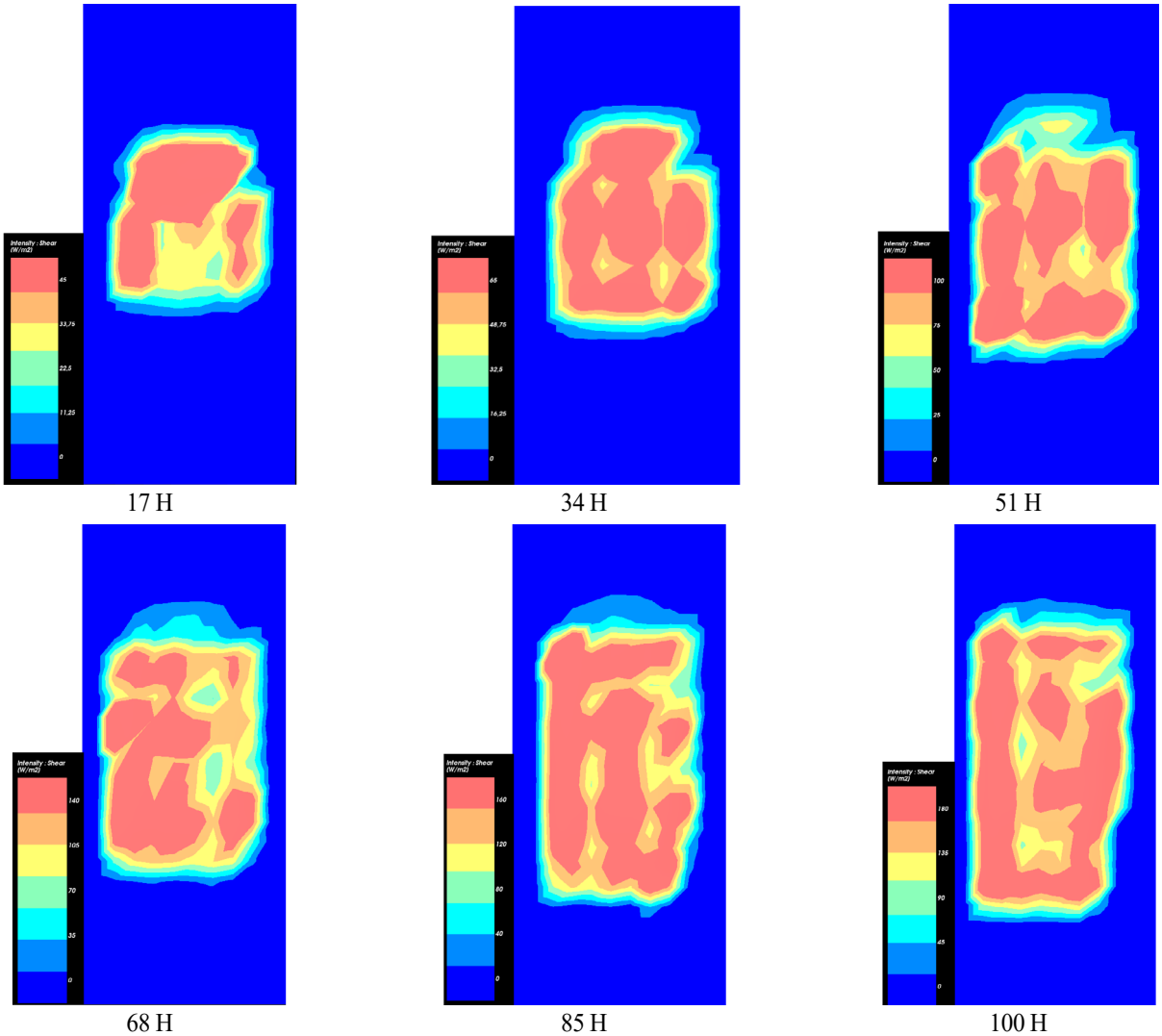


Рис. 3. Визуализация интенсивности износа W, Вт/м², при различной нагрузке на деталь

Fig. 3. Visualization of wear intensity W, W/m², under different loads on the part

Данные рисунка 3 наглядно демонстрируют эволюцию пространственного распределения интенсивности абразивного износа при увеличении нагрузки от 17 до 100 Н. Отметим основные особенности износа:

– при $N < 30$ Н износ является минимальным, что показывает наличие пороговой нагрузки, ниже которой интенсивность износа низкая;

– при $N > 50$ Н наблюдается переход от центрального износа к краевому (подковообразная форма);

– при высоких нагрузках $N > 85$ Н вклад краевых зон доминирует в суммарном объеме износа и формируется W-образное распределение интенсивности износа с двумя боковыми максимумами ввиду деформации резинового обода.

Комбинированное моделирование позволяет также получать информацию о напряжениях в зоне контакта образца и колеса. Увеличение давления, действующее на поверхность образца, увеличивает износ материала.

На рисунке 4 представлены временные реализации нормального напряжения в зоне контакта образца с колесом при нагрузках 17, 51 и 100 Н. Можно заметить, что с увеличением нагрузки возрастает как среднее значение напряжения (с 800 МПа при 17 Н до 4200 МПа при 100 Н), так и амплитуда его колебаний. Колебания обусловлены дискретным характером подачи частиц песка: при прохождении единичной частицы через зону контакта возникает локальный пик давления. С ростом нагрузки частота и высота пиков возрастают, что интенсифицирует микрорезание и усталостные механизмы износа.

Средние значения напряжений в зоне контакта образца и резинового колеса при различных нагрузках, полученные при усреднении данных нормального напряжения по времени (рис. 4), показаны на рисунке 5.

Гистограммы распределения напряжений (рис. 5) при повышенных нагрузках имеют выраженную асимметрию в сторону высоких значений (до 28000 МПа), в то время как при 17 Н разброс является незначительным, с максимумом 1000…1500 МПа. Это подтверждает, что при высоких нагрузках доминирует абразивное воздействие крупных частиц, а не постоянное давление резинового обода.

Эволюция пятна износа на образце в зависимости от нагрузки показана на рисунке 6. При нагрузке 17 Н в конце испытаний зона износа остается локализованной в центральной части следа колеса (площадь – ~12 мм^2). При 100 Н формируется обширная область (площадь – ~48 мм^2) с выраженным «корытообразным» профилем. Особый интерес представляет появление двух боковых зон повышенного износа

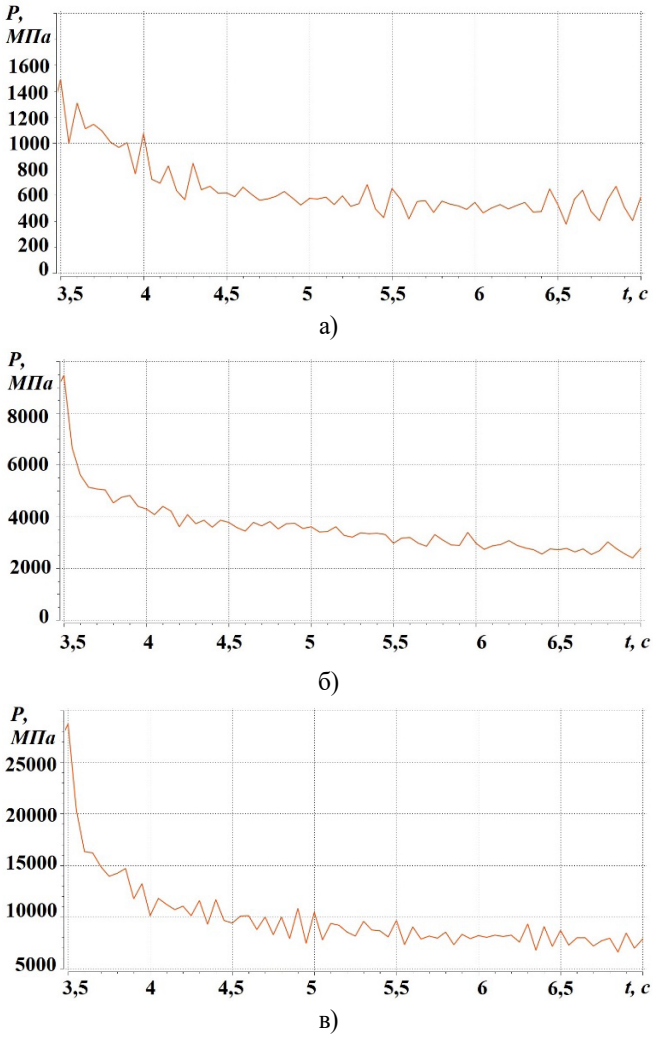


Рис. 4. Изменение нормального напряжения в зоне контакта по времени при различных нагрузках: а) N = 17 Н; б) N = 51 Н; в) N = 100 Н

Fig. 4. Variation of normal stress in the contact zone over time under different loads: a) N = 17 N; b) N = 51 N; c) N = 100 N

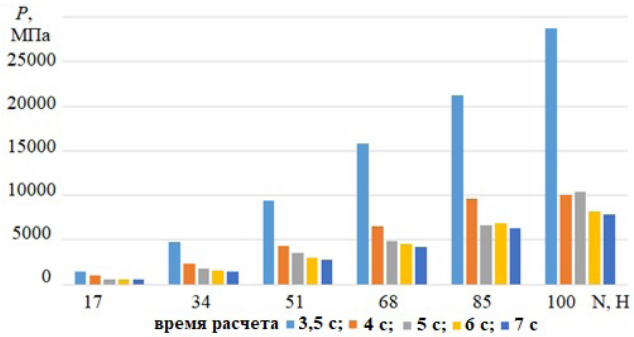


Рис. 5. Гистограммы напряжений в зоне контакта при различных нагрузках в разные моменты

Fig. 5. Histograms of stresses in the contact zone under different loads at different time points

при нагрузках 68…100 Н (рис. 3), что объясняется деформацией резинового обода: края контактной площади испытывают большие сдвиговые деформации,

прижимающие абразивные частицы под углом к поверхности образца.

Результаты объемного износа при разной нагрузке обода колеса на деталь по времени расчета представлены в таблице 2.

Анализ данных таблицы 2 показывает нелинейный рост объемного износа V_m при увеличении нагрузки. Например, за 7 с при 17 Н износ составил 40,17 мм^3, при 34 Н – 73,34 мм^3, при 51 Н – 126,82 мм^3, а при 100 Н – 328,52 мм^3. Зависимость аппроксимируется степенной функцией $V_m \approx 1{,}22N^{1,2}$ (коэффициент детерминации $R^2 = 0{,}98$), что характерно для абразивного износа с участием эластичного контртела. Отклонение от линейного закона Арчарда ($V_m \approx N$) объясняется ростом фактической площади контакта за счет вдавливания резины при высоких нагрузках, что увеличивает число одновременно работающих абразивных частиц.

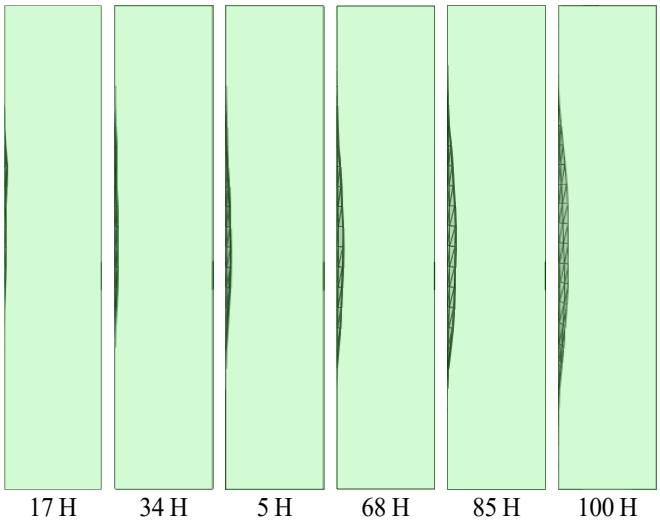


Рис. 6. Характер износа моделируемого образца при различных нагрузках

Fig. 6. Wear pattern of the simulated sample under different loads

Результаты расчета потери массы образца (сталь 45, плотность ρ = 7850 кг/м^3) по данным объемного износа из таблицы 1 за 7 с модельного расчета представлены в таблице 3.

Значения массы износа m получены при масштабировании пути скольжения с коэффициентом α = 1000. Это означает, что в реальных условиях (без масштабирования) такой же объем износа достигался бы на пути, в 1000 раз большем. Однако для лабораторной установки ASTM G65 данные значения могут быть непосредственно использованы для калибровки модели при известном пути скольжения.

График объемного износа образца испытуемой детали в зависимости пройденного пути и времени при разном давлении обода колеса изображен на рисунке 7. График зависимости массового износа от нагрузки по данным таблицы 3 представлен на рисунке 8.

Все кривые объемного износа (рис. 7) имеют три характерные зоны:

1. Зона приработки (s = 0…2000 мм), характеризующаяся высоким темпом износа, особенно при N > 50 Н (скорость – до 70 мм^3/мм).

2. Зона установившегося износа (s = = 2000…8000 мм), отличающаяся снижением скорости до 30…40 мм^3/мм (для 100 Н) ввиду образования упрочненного поверхностного слоя.

Таблица 2

Объемный износ V_m, мм^3, при разной нагрузке N и времени расчета t

Table 2

Volumetric wear V_m, mm^3, under different loads N and calculation times t

Время t, с	Объемный износ образца V_m, мм^3, при нагрузках N					
	17 Н	34 Н	51 Н	68 Н	85 Н	100 Н
3,5	0	0	0	0	0	0
4	5,65	13,24	22,29	32,7	48,93	65,05
5	16,46	33,83	59,34	88,92	124,14	159,32
6	27,3	53,52	94,98	138,61	191,46	248,48
7	40,17	73,34	126,82	183,85	255,95	328,52

Таблица 3

Потеря массы m, г, образца в зависимости от нагрузки N

Table 3

Mass loss m, g, of the sample as a function of load N

Нагрузка N, Н	17	34	51	68	85	100
Масса износа m, г	0,32	0,58	1,0	1,44	2,01	2,58

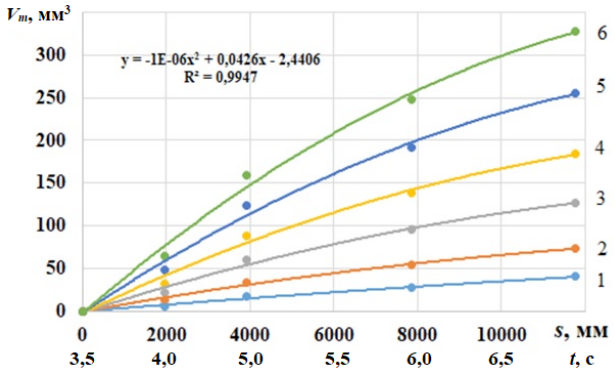


Рис. 7. Зависимость объемного износа (V_m, мм³) от пройденного пути (*s*, мм) и времени (*t*, с):
1) N = 17 Н; 2) N = 34 Н; 3) N = 51 Н; 4) N = 68 Н; 5) N = 85 Н; 6) N = 100 Н

Fig. 7. Relationship between volumetric wear (V_m, mm³), the distance traveled (*s*, mm), and time (*t*, s):
1) N = 17 N; 2) N = 34 N; 3) N = 51 N; 4) N = 68 N; 5) N = 85 N; 6) N = 100 N

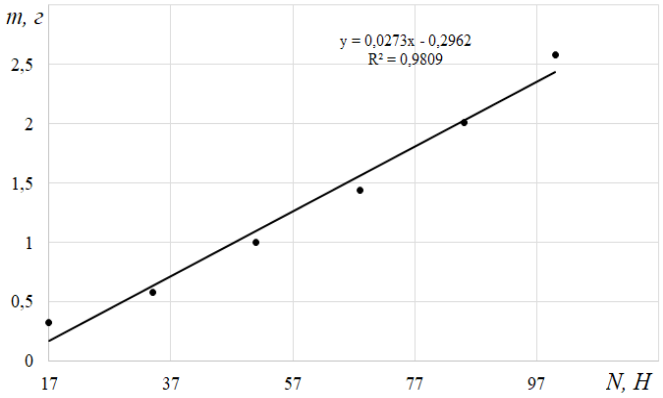


Рис. 8. Зависимость массового износа (*m*, г) от нагрузки (*N*, Н)

Fig. 8. Relationship between mass wear (*m*, g) and load (*N*, N)

3. Зона ускоренного износа (s =8000…10000 мм), характеризующаяся ростом скорости износа при N ≥ 85 Н, связанным с достижением критической пластической деформации поверхностного слоя и выкрашиванием частиц материала.

График зависимости массового износа *m* от нагрузки *N* (рис. 8) аппроксимирован нами линейной зависимостью согласно закону Арчарада, где объем (и масса) износа прямо пропорциональны нормальной нагрузке *N* и пути скольжения *L* (формула 1). Однако можно заметить, что при малых нагрузках (17…34 Н) прирост износа невелик, затем, начиная с 51 Н, темп роста увеличивается. Наибольшее абсолютное приращение массы износа наблюдается между 85 и 100 Н – около 0,57 г.

Наилучшее приближение зависимости массового износа *m* от нагрузки *N* достигается при использовании линейной функции $m \approx 0{,}0273 \cdot N$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0{,}9809$. Таким образом, линейная зависимость $m = f(N)$ полностью соответствует теоретическим ожиданиям. Отклонение от линейности на начальном участке (17…34 Н) может объясняться порогом истирания: при низких нагрузках частицы песка не внедряются достаточно глубоко и механизм микрорезания активируется не в полной мере. Однако в целом в диапазоне 34…100 Н зависимость остается линейной, что подтверждает корректность использованной модели и масштабирования пути скольжения.

Сравнение мономодели DEM (только Rocky) с гибридной FEM-DEM показало, что учет упругости резины повышает точность прогноза объемного износа на 15…20% для нагрузок выше 50 Н, поскольку в мономодели контактное давление завышается ввиду жесткой фиксации геометрии колеса. Гибридный подход также позволяет оценивать остаточные напряжения в образце после прохождения абразивной ленты, что является важным для прогнозирования усталостной долговечности реальных рабочих органов ПОМ.

Полученные закономерности согласуются с результатами Katinas и др. [12] для песчаных почв и Schramm и др. [13] для тестов с царапанием. В то же время впервые для резино-песчаной установки показано, что переход к нагрузкам более 80 Н приводит к качественной смене механизма износа: от микрорезания к фрагментации поверхностного слоя с отделением частиц размером 50…100 мкм. Примененный гибридный FEM-DEM подход позволяет моделировать этот эффект в отличие от классического DEM с жесткими стенками.

Потеря массы образца m = 2,58 г при нагрузке N = 100 Н за 7 с моделирования (табл. 3) хорошо согласуется с типичной массой износа для стали 45 в резино-песчаном тесте [12].

Ограничением метода является необходимость калибровки не только контактных параметров DEM (трение, восстановление), но и гиперупругой модели резины. Однако, как показано в наших расчетах, чувствительность выходного износа к вариациям коэффициента Пуассона резины в пределах 0,45…0,49 не превышает 7%, а к модулю упругости (в диапазоне 200…400 МПа) – 12%. Это делает метод устойчивым для инженерных приложений.

С практической точки зрения выявленная нелинейность износа с нагрузкой и наличие пороговой нагрузки (≈50 Н для стали 45) могут быть использованы при выборе режимов работы почвообрабатывающих орудий: превышение скорости, приводящее к росту контактных сил выше порогового значения, вызывает лавинообразное увеличение износа.

Для культиваторных лап, работающих в песчаных почвах, это означает необходимость ограничения скорости движения 8…9 км/ч, тогда как на глинистых почвах пороговая нагрузка может быть выше.

Выводы

1. Разработанная гибридная методика моделирования абразивного износа, сочетающая метод дискретных элементов (Rocky DEM) для песчаных частиц и метод конечных элементов (ANSYS) для упругодеформируемого резинового колеса и стального образца, позволяет учитывать перераспределение контактных давлений и эволюцию геометрии поверхности в процессе износа.

2. Массовый износ растет по линейной зависимости $m \approx 0{,}0273 \cdot N$ (при N от 34 до 100 Н) и имеет три временные стадии: приработка, установившийся износ и ускоренный износ (при $N \geq 85$ Н). При нагрузке 100 Н массовый износ достигает 2,58 г на пути скольжения, масштабированном с коэффициентом $\alpha = 1000$.

3. Эволюция пятна износа показывает, что при нагрузках 68…100 Н формируются боковые зоны повышенного износа, вызванные деформацией резинового обода. Площадь износа при 100 Н через 4 с достигает 48 мм^2, что в 4 раза превышает площадь контакта по Герцу.

4. Сравнение мономодели DEM и гибридной FEM-DEM показало повышение точности прогноза объемного износа на 15…20% для нагрузок >50 Н за счет учета упругого вдавливания резины. Рекомендуется использовать гибридный подход для моделирования рабочих органов ПОМ, взаимодействующих с абразивной средой через эластичные элементы (например, колесные ножи, катки).

5. Полученные зависимости позволяют обоснованно назначать режимы работы почвообрабатывающих машин (скорость, глубину обработки) с целью минимизации удельного износа. В частности, для условий песчаных почв с включениями кварца критическая нагрузка на лезвие не должна превышать 50 Н на 1 см^2 режущей кромки.

Перспективы дальнейших исследований включают в себя валидацию разработанной модели на натурных стендах с измерением профиля изношенной поверхности оптическими методами, а также учет коррозионно-механического износа при переменной влажности почвы.

Список источников/ References

1. Сидоров С.А., Лялякин В.П., Зволинский В.Н., Миронов Д.А. Повышение технического уровня рабочих органов агрегатов для предпосевной обработки почвы // Технический сервис машин. 2019. № 1 (133). С. 136-148. EDN: YUGVWH

Sidorov S.A., Lyalyakin V.P., Zvolinsky V.N., Mironov D.A. Improving the technical level of the working bodies tools for pre-sowing tillage. *Machinery Technical Service*. 2019;1:136-148. (In Russ.)

2. Yazıcı A. Wear on steel tillage tools: A review of material, soil and dynamic conditions. *Soil and Tillage Research*. 2024;242:106161. https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106161

3. Singh D., Nandede B.M., Raul A.K., Singh R.S. Effect of heat treatment on wear rate of different agricultural grade steels and associated cost economics. *Economic Affairs*. 2018;63(1):203-208. https://doi.org/10.30954/0424-2513.2018.00150.25

4. Spakale P.R., Tiwari G., Sharma A.K. Influence of surface hardening processes on wear characteristics of soil working tools-a review. *International Journal of Engineering Science and Emerging Technologies*. 2016;8(4):191-201

5. Миронов Д.А., Костомахин М.Н., Лискин И.В. Исследования закономерностей изнашивания лезвий почвообрабатывающих деталей // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2024. № 6. С. 19-26. https://doi.org/10.33920/sel-10-2406-04

Mironov D.A., Kostomakhin M.N., Liskin I.V. Simulation of soil cutting blade wear. *Selskokhozyaystvennaya tekhnika*: *obsluzhivanie i remont.* 2024;6:19-26. (In Russ.) https://doi.org/10.33920/sel-10-2406-04

6. Karamis M.B. Energy losses resulting from tillage tool wear in Turkish agricultural fields, In: Third International Symposium Ismir, Turkey, October 26-29, *Mechanization and Energy in Agriculture*: Proceedings. Pp. 211-219.

7. Kostencki P., Stawicki T., Królicka A. Wear of the working parts of agricultural tools in the context of the mass of chemical elements introduced into soil during its cultivation. *International Soil and Water Conservation Research*. 2021;9(2):229-240. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.11.001

8. Bedolla P.O., Vorlaufer G., Rechberger C. et al. Combined experimental and numerical simulation of abrasive wear and its application to a tillage machine component. *Tribology International*. 2018;127:122-128. https://doi.org/10.1016/j.triboint. 2018.03.019

9. Katinas E., Chotěborský R., Linda M., Jankauskas V. Wear modelling of soil ripper tine in sand and sandy clay by discrete element method. *Biosystems Engineering*. 2019;188:305-319. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng. 2019.10.022

10. Zhang P., Zhang X., Hu X. et al. Simulation and experimental study on frictional wear of plough blades in soil cultivation process based on the Archard model. *Biosystems Engineering*. 2024;248:190-205. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng. 2024.10.009

11. Schramm F., Kalácska Á., Pfeiffer V. et al. Modelling of abrasive material loss at soil tillage via scratch test with the discrete element method. *Journal of Terramechanics*. 2020;91:275-283. https://doi.org/10.1016/j.jterra. 2020.08.002

12. Cai Z., Yan J., Qiao Y. et al. Impact wear behavior of austenitic steel bucket teeth based on machine learning. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025;36:6128-6141. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.04.258

13. Wang Y., Li D., Nie C. et al. Research progress on the wear resistance of key components in agricultural machinery. *Materials*. 2023;16(24):7646. https://doi.org/10.3390/ma16247646

14. Tekeste M.Z., Balvanz L.R., Hatfield J.L., Ghorbani S. Discrete element modeling of cultivator sweep-to-soil interaction: Worn and hardened edges effects on soil-tool

forces and soil flow. *Journal of terramechanics*. 2019;82:1-11. https://doi.org/110.1016/j.jterra.2018.11.001

15. Ucgul M. Simulating soil-disc plough interaction using discrete element method-multi-body dynamic coupling. *Agriculture*. 2023;13(2):305. https://doi.org/10.3390/agriculture13020305

16. Mudarisov S.G., Gabitov I., Lobachevsky Ya. et al. Systematic evaluation and experimental validation of discrete element method contact models for soil tillage simulation. *AgriEngineering*. 2025;7(8):256. https://doi.org/10.3390/agriengineering7080256

17. Mudarisov S.G., Farkhutdinov I.M., Bagautdinov R.Yu. Justification of dual-level opener parameters in digital twin by the discrete element method. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(2):229-243. https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.229-243

18. Mudarisov S.G., Lobachevsky Ya.P., Farkhutdinov I.M. et al. Justification of the soil dem-model parameters for predicting the plow body resistance forces during plowing. *Journal of Terramechanics*. 2023;109:37-44. https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.06.001

19. Archard J.F. Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*. 1953;24(8):981-988. https://doi.org/10.1063/1.1721448

20. Zhang P., Zhang X., Hu X. et al. Simulation and experimental study on frictional wear of plough blades in soil cultivation process based on the Archard model. *Biosystems Engineering*. 2024;248:190-205. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.10.009

21. Katinas E., Chotěborský R., Linda M., Kuře J. Sensitivity analysis of the influence of particle dynamic friction, rolling resistance and volume/shear work ratio on wear loss and friction force using DEM model of dry sand rubber wheel test. *Tribology International*. 2021;156:106853. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106853

Информация об авторах

[1] **Мударисов Салават Гумерович,** д-р техн. наук, профессор; salavam@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-9344-2606; SPIN-код: 6893-9957

[2] **Фархутдинов Ильдар Мавлиярович,** д-р техн. наук, доцент; ildar1702@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-6443-8584; SPIN-код: 8646-6670

[3] **Фаюршин Азамат Фаритович,** канд. техн. наук, доцент; azamatff@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-8787-8750; SPIN-код: 5544-8158

[4] **Имангулов Венер Ханифович,** младший научный сотрудник; imangulov.vener@mail.ru; https://orcid.org/0009-0000-9171-2369; SPIN-код: 4345-2695

[1, 2, 3, 4] **Башкирский государственный аграрный университет,** кафедра мехатронных систем и машин аграрного производства; 450001, Российская Федерация, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. 50 лет Октября, 34

Вклад авторов

С.Г. Мударисов – руководство исследованиями, концептуализация, методология, создание и подготовка рукописи;
И.М. Фархутдинов – разработка компьютерных программ, осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных, формальный анализ;
А.Ф. Фаюршин – проведение исследований, интерпретация результатов;
В.Х. Имангулов – проведение исследований, верификация данных, визуализация;

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 08.05.2026, после рецензирования и доработки 08.07.2026, принята к публикации 12.07.2026

Author Information

Salavat G. Mudarisov [1], DSc (Eng), Professor; salavam@gmail.com✉; https://orcid.org/0000-0001-9344-2606; Scopus Author ID: 57200284613

Ildar M. Farkhutdinov [3], DSc (Eng), Associate Professor; ildar1702@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-6443-8584; ResearcherID: G-2816-2018

Azamat F. Fayurshin [3], CSc (Eng), Associate Professor; azamatff@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-8787-8750; Scopus Author ID: 57205764476

Vener Kh. Imangulov [4], Junior Research Fellow; imangulov.vener@mail.ru

[1, 2, 3, 4] Bashkir State Agrarian University, Department of Mechatronic Systems and Machines for Agricultural Production; 50 Let Oktyabrya Str., 34, Ufa, 450001, Republic of Bashkortostan, Russian Federation

Author Contributions

S.G. Mudarisov – supervision, conceptualization, methodology, writing – original draft;
I.M. Farkhutdinov – software development, investigation; data curation; formal analysis;
A.F. Fayurshin – investigation, formal analysis;
V.Kh. Imangulov – investigation, validation, visualization.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest and are responsible for plagiarism.

Received 08.05.2026; Revised 08.07.2026; Accepted 12.07.2026