

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/12>

УДК 630*85:631.3.02

Моделирование взаимодействия почвы с комбинированным орудием – ножевой каток и пара дисковых плугов

Леонид Д. Бухтояров¹ , vglta-mlx@yandex.ru,  0000-0002-7428-0821

Михаил Н. Лысыч¹, miklynea@yandex.ru,  0000-0002-3764-3873

Сергей В. Малюков¹, malyukovsergey@yandex.ru,  0000-0003-2098-154X

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

Обработка почвы при лесовосстановлении на вырубленных территориях сталкивается с проблемой низкой эффективности традиционных методов, обусловленной сложностью лесных грунтов, высокой стоимостью полевых экспериментов и ограниченной воспроизводимостью результатов. Это препятствует созданию оптимальных технологий, обеспечивающих приживаемость лесных культур и улучшение структуры почвы. Исследование направлено на решение этой проблемы через разработку вычислительной модели взаимодействия лесной почвы с комбинированным орудием, включающим ножевой каток и два дисковых плуга, с использованием метода дискретных элементов (DEM). Модель позволяет анализировать совместное воздействие рабочих органов на почву, что важно для повышения качества обработки и снижения энергозатрат. Материалы и методы исследования включают моделирование почвы как набора сферических частиц с заданными физическими свойствами (масса, положение, скорость, сила). Взаимодействие частиц описывается моделью контакта с пружиной и демпфером, а геометрия орудий импортируется из OBJ-файлов, созданных в системах автоматизированного проектирования (САПР). Программная реализация выполнена на языке Delphi. Исследование проводилось в несколько этапов: определение параметров контакта, расчёт сил взаимодействия, оценка деформации почвы и оптимизация конструкции орудия на основе 20 компьютерных экспериментов с варьированием факторов (заглубление катка от -5 до 5 см, боковое смещение плугов от -5 до 5 см, угол атаки плугов 15–30°). Результаты показали, что оптимальные параметры орудия составляют: заглубление катка от -2 до -1 см, боковое смещение плугов 4–5 см, угол атаки плугов 22–24°. При этих значениях коэффициент полноты рыхления превышает 60%, коэффициент оборачиваемости пласта – 24%, коэффициент измельчения напочвенного покрова – 56%, а сила сопротивления движению не превышает 4800 Н. Теоретически это подтверждает применимость DEM для точного моделирования сложных почвенных систем. Практически параметры обеспечивают снижение энергозатрат на 15–20% по сравнению с традиционными орудиями, улучшая условия для лесовосстановления. Ключевое преимущество исследования для читателей заключается в предоставлении научно обоснованных параметров для проектирования комбинированных орудий, что способствует повышению эффективности лесовосстановительных работ. Нерешённым остается вопрос адаптации модели к почвам с высоким содержанием корней, что требует дальнейших исследований с учётом дополнительных факторов, таких как влажность и плотность органических остатков.

Ключевые слова: почвообрабатывающие орудия, ножевые катки, дисковые рабочие органы, комбинированные машины, вырубки, тяговое сопротивление рабочих органов, метод дискретных элементов (DEM)

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010/>

Благодарности: Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Бухтояров, Л. Д. Моделирование взаимодействия почвы с комбинированным орудием – ножевой каток и пара дисковых плугов / Л. Д. Бухтояров, М. Н. Лысич, С. В. Малюков // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 3 (59). – С. 186–200. – Библиогр.: с. 197–199 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/12>

Поступила 03.04.2025 Пересмотрена 02.09.2025 Принята 15.09.2025 Опубликована онлайн 25.09.2025

Article

Modeling the interaction of soil with a combined tool - a knife roller and a pair of disc plows

Leonid D. Bukhtoyarov¹✉, vglta-mlx@yandex.ru,  0000-0002-7428-0821

Mikhail N. Lysych¹, miklynea@yandex.ru,  0000-0002-3764-3873

Sergey V. Malyukov¹, malyukovsergey@yandex.ru,  0000-0003-2098-154X

¹ FSBEI HE Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva street, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

Abstract

Tillage during reforestation of cut-down areas faces the problem of low efficiency of traditional methods caused by complexity of forest soils, high cost of field experiments and limited reproducibility of results. This hinders creation of optimal technologies ensuring survival of forest crops and improvement of soil structure. The study is aimed at solving this problem through development of a computational model of interaction of forest soil with a combined tool, including a knife roller and two disc ploughs, using the discrete element method (DEM). The model allows analyzing the combined effect of working bodies on the soil, which is important for improving the quality of cultivation and reducing energy costs. Materials and methods of the study include modeling of soil as a set of spherical particles with specified physical properties (mass, position, velocity, force). Interaction of particles is described by a contact model with a spring and damper, and the geometry of the tools is imported from OBJ files created in computer-aided design (CAD) systems. The software implementation is implemented in Delphi. The study was conducted in several stages: determining the contact parameters, calculating the interaction forces, assessing the soil deformation and optimizing the tool design based on 20 computer experiments with varying factors (roller depth from -5 to 5 cm, lateral shift of plows from -5 to 5 cm, plow attack angle from 15-30°). The results showed that the optimal tool parameters are: roller depth from -2 to -1 cm, lateral shift of plows 4-5 cm, plow attack angle 22-24°. With these values, the coefficient of loosening completeness exceeds 60%, the coefficient of soil turnover is 24%, the coefficient of ground cover crushing is 56%, and the resistance force to movement does not exceed 4800 N. Theoretically, this confirms the applicability of DEM for accurate modeling of complex soil systems. In practice, the parameters provide a decrease in energy costs by 15-20% compared to traditional tools, improving the conditions for reforestation. The key benefit of the study for readers is the provision of scientifically substantiated parameters for the design of combined tools, which contributes to increasing the efficiency of reforestation work. The issue of adapting the model to soils with a high root content remains unresolved, which requires further research taking into account additional factors such as moisture and density of organic residues.

Keywords: tillage implements, knife rollers, disc working bodies, combined machines, felling machines, traction resistance of working bodies, discrete element method (DEM)

Funding: The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010/>

Acknowledgement: The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declares no conflict of interest.

For citation: Bukhtoyarov L. D., Lysych M. N., Malyukov S. V. (2025). Modeling the interaction of soil with a combined tool - a knife roller and a pair of disc plows. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 3 (59), pp. 186-200 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/12>.

Received 03.04.2025 *Revised* 02.09.2025 *Accepted* 15.09.2025 *Published online* 25.09.2025

Введение

Современное лесное хозяйство сталкивается с необходимостью разработки эффективных технологий обработки почвы, особенно в контексте лесовосстановления на вырубленных территориях. Обработка почвы играет ключевую роль в обеспечении приживаемости лесных культур, улучшении структуры грунта и создании условий для роста новых насаждений. Современные технологии лесовосстановления зачастую предусматривают широкие диапазоны для выставления параметров орудий чтобы они обеспечили баланс качества обработки и энергозатрат в меняющихся почвенных условиях. В России и за рубежом [1, 2] ведутся работы по усовершенствованию и созданию новых эффективных комбинированных машин и агрегатов. При разработке и модернизации машин и агрегатов центральное место занимают повышение качества и уменьшение энергозатрат при обработке почвы [3, 4]. Для комбинации дисковых рабочих органов и глубокорыхлителя исследования по обоснованию параметров взаимного расположения рабочих органов проводились Малюковым С.В. и др. (2023) [5, 6], что позволило определить энергетические и качественные показатели работы почвообрабатывающего агрегата.

Традиционные подходы к изучению взаимодействия почвы с орудиями, основанные на полевых экспериментах, сопряжены с высокими затратами времени, ресурсов и ограниченной воспроизводимостью результатов. В этом контексте численные методы, такие как метод дискретных элементов (DEM), становятся важным инструментом для анализа динамики почвенных процессов и оптимизации конструкции сельскохозяйственных и лесных машин.

Метод дискретных элементов зарекомендовал себя как мощный инструмент для моделирования дискретных систем, включая почву, которая

представляется как совокупность отдельных частиц с определёнными физическими свойствами. Обзор литературы, представленный в статье Aikins K.A. и др. (2023) [7], подчёркивает, что DEM превосходит методы конечных элементов (FEM), в моделировании разрушения почвы и динамики её частиц благодаря возможности детального анализа контактных сил и перемещений. При исследованиях почвы с помощью подходов DEM проводят калибровку параметров модели для достижения соответствия реальным условиям. Так, в работе Dongxu Yan. и др. (2022) [8] для песчаного суглинка применялась модель Edinburgh Elasto-Plastic Adhesion (EEPA), что обеспечило ошибку менее 8,8% при верификации прочности на сдвиг, аналогично, Ma X. и др. (2024) [9] калибровали параметры для сухой почвы лесов, достигнув ошибки угла откоса в 2,44%. Эти исследования подчёркивают важность учёта, влажности и когезионных свойств почвы, что актуально и для лесных грунтов.

В обзоре Zhao H. и др. (2021) [10] отмечается, что DEM превосходит FEM и SPH в точности предсказания разрушения почвы, хотя требует значительных вычислительных ресурсов. При использовании метода дискретных элементов для задач описывающих моделирование взаимодействия почвы с комбинированным лесным орудием целесообразно различать три взаимосвязанных направления. Первое направление касается моделирования свойств почвы и её взаимодействия с лесными орудиями. Ahmad F. и др. (2020) [11] показывают применение DEM для анализа взаимодействия дисковых бороздоделателей с почвой, подчёркивая важность калибровки параметров для когезионных грунтов. Nelson R. M. и др. (2020) [12] использовали DEM для обоснования параметров отвального плуга, варьируя скорость, глубину и плотность грунта. Валидацию результатов выполнили с помощью полевых испы-

таний. Относительная ошибка между моделью и полевыми испытаниями составила менее 4,5%. Tienan Z. и др. (2023) [13] используя DEM, схему Hertz-Mindlin и тест на осадку илисто-глинистой почвы учили когезионные свойства грунта. Это направление показывает, как DEM может быть адаптирован для специфических типов почв и лесных орудий. Второе направление рассматривает анализ силовых характеристик и оптимизацию конструкции орудий. Jin Zhang и др. (2023) [14] применили DEM для оптимизации геометрических параметров ротационного ножа, с учетом его энергопотребления и степени дробления почвы, Yin L. и др. (2025) [15] оптимизировали дисковый рабочий орган машины для расчистки лугов путем моделирования её взаимодействие с травой в программном комплексе EDEM. Wu J. и др. (2022) [16] моделировали тяговые характеристики гусеничного движителя на мягком грунте, показывая применимость DEM для оценки сил сопротивления движению, что также актуально для анализа движения комбинированного лесного орудия. Третье направление посвящено изучению сложных систем, таких как почва-растение-машина. Zhao Z. и др. (2023) [17] методами DEM анализировали динамику почвы при ротационной обработке и выявили преимущества обратного вращения лезвий. В обзоре Walunj A. и др. (2023) [18] обобщает применение DEM к системам почва-растение-машина, включая обработку почвы и срезание растительности, что расширяет контекст применения метода в лесном хозяйстве. Zeng Z. и др. (2020) [19] также изучали взаимодействие почвы с кукурузными остатками, показав, как различные инструменты влияют на их смещение, что важно для анализа воздействия орудий на органические компоненты лесной почвы. Tian Y. (2024) и др. [20] исследуют подходы моделирования корней и растительных остатков, предлагая интеграцию DEM с машинным обучением.

Таким образом, актуальной задачей является фокусировка на разработке DEM-модели для комбинированного орудия, включающего ножевой каток и два дисковых плуга. Отличительным признаком планируемого нами исследования является интеграция нескольких рабочих органов в единую имитационную среду, что позволит оценить их совместное

воздействие на лесную почву. Такой подход перекликается с исследованиями по оптимизации конструкции машин, проведенному в работах и Jin Zhang и др. (2023) [14], где DEM использовался для анализа силовых характеристик и улучшения эффективности орудий. Кроме того, акцент на лесовосстановлении перекликается с исследованиями сложных систем почва-растение-машина Walunj A. I. и др. (2023) [18], где учитываются специфические условия почвы и её взаимодействие с техникой.

При разработке физико-математической модели классическим подходом принято считать использование принципов теорий машин и механизмов и механики контакта твердых тел. Именно на основе механика контакта и динамика Ньютона проведены исследования Nelson R.M. и др. (2020) [12]. Ahmad F. и др. (2020) [11] использовали цепочку действий, а именно, создавали трёхмерные модели в Pro/Engineer далее экспортировали их для симуляции в EDEM. Zhao Z. и др. (2023) [17] фокусировался на технологическом результате, оценивая степень дробления почвы и перемещения растительных остатков.

Анализ работ авторов демонстрирует, что DEM является современным методом для моделирования взаимодействия почвы с орудиями, а его эффективность зависит от точной калибровки параметров модели, учёта физико-механических свойств почвы и корректного представления геометрии разрабатываемых орудий. Следуя этим принципам, нами предлагается разработать комплексную вычислительную модель, которая объединяет ножевой каток и дисковые плуги в единой среде DEM. Теоретическая часть, представленная в статье, закладывает фундамент для этих расчётов, и её рассмотрение позволит раскрыть, как нами были адаптированы общие принципы DEM к специфике лесной почвы и комбинированного орудия.

Переходя к теоретической части, отметим, что она начинается с описания моделирования почвы как набора сферических частиц, каждая из которых характеризуется массой, положением, скоростью и силой. Взаимодействие частиц регулируется моделью контакта с пружиной и демпфером, что соответствует стандартным подходам DEM, описанным в работе Wu J. и др. (2022) [16]. Упругая сила,

вычисляемая по закону Гука, и демпфирующая сила, имитирующая вязкость почвы, формируют основу для анализа контактных взаимодействий и далее вводятся уравнения для расчёта сил и движения частиц. Переходим к непосредственному рассмотрению новой DEM-симуляции комбинированной системы лесных орудий, объединяющей физические законы, геометрическое моделирование и вычислительные подходы для оценки поведения почвы под сложным механическим воздействием. В работе мы акцентируем внимание на работоспособность DEM-модели взаимодействия лесной почвы с комбинированным орудием (ножевой каток + пара дисковых плугов) с целью первичного обоснования диапазонов настроек параметров орудия не требующих специальных метрологических инструментов, используя только нанесенные на орудия шкалы расстояний и углов. Мы не заявляем прямых биологических эффектов таких как приживаемость культур, а рассматриваем только DEM-модель орудия и его взаимодействие с почвой. Модель опирается на общепринятый для DEM компромисс точности и вычислительной мощности и может быть реализована без использования суперкомпьютеров, на системах с современным шестиядерным процессором частотой 3,5 ГГц и более. Для практического выбора используется компромиссная логика – минимизация тягового сопротивления при одновременном обеспечении требуемых технологических показателей (рыхление, обработка пласти, разрушение напочвенного покрова).

Цель работы: разработка и демонстрация работоспособности DEM-модели для комбинированного орудия и первичное обоснование параметров на основе серии численных экспериментов.

Материалы и методы

Валидацию результатов вынесем за рамки исследования и сфокусируем работу на построении и демонстрации работоспособности DEM-модели. Почву моделируем как набор сферических частиц, каждая из которых характеризуется массой m , положением (x, y, z) скоростью (v_x, v_y, v_z) и силой (F_x, F_y, F_z) . Взаимодействие частиц регулируется моделью контакта с пружиной и демпфером.

Упругая сила (закон Гука) между двумя частицами противодействует перекрытию частиц и вычисляется по формуле

$$F_{el} = k_{zh}(D - r) \quad (1)$$

где k_{zh} – коэффициент жесткости, Н/м;

D – диаметр частицы, м;

r – расстояние между центрами частиц, м.

Демпфирующая сила (закон вязкого трения) имитирует вязкость почвы, рассеивая энергию и снижая накопление ошибок в результате высокочастотного взаимодействия частиц, вычисляется по формуле:

$$F_{damp} = -k_{damp} \cdot \Delta V \quad (2)$$

где k_{damp} – коэффициент демпфирования, Н/м;

ΔV – относительная скорость в направлении контакта, м;

Силу тяжести находим по известной формуле $F_z = -m \cdot g$. Знак минус указывает что сила тяжести направлена вниз по оси Z.

Трехмерные модели орудий были спроектированы в САПР и сохранены в формате OBJ. В файле находятся данные вершин $B[i].x, B[i].y, B[i].z$, данные нормалей вершин $N[j].x, N[j].y, N[j].z$, и данные граней (каждая грань содержит три пары индексов, а именно индексы вершин и соответствующие им нормали) $F[k].v_1, F[k].v_2, F[k].v_3$ и $F[k].n_1, F[k].n_2, F[k].n_3$. Эти данные импортируются в соответствующие массивы программного кода и используются при расчете.

При моделировании контакта между орудиями и частицами почвы происходит обнаружение проникновения и расчет контактных сил.

Для каждой частицы расстояние до поверхности треугольника орудия вычисляется по уравнению плоскости

$$cA[i]x + cB[i]y + cC[i]z + cD[i] = 0 \quad (3)$$

где $cA[i], cB[i], cC[i]$ – коэффициенты, задающие нормаль к плоскости треугольника с индексом i (компоненты вектора нормали $\vec{N} = (cA[i], cB[i], cC[i])$); $cD[i]$ – свободный член, определяющий расстояние от начала координат до плоскости вдоль нормали;

(x, y, z) – координаты центра частиц почвы, для которой проверяется контакт.

Это уравнение плоскости задается для каждого треугольника, из которых состоит поверхность орудия (ножевого катка). Коэффициенты вычисляются на основе координат вершин треугольника из ОВГ файла перед началом имитационного эксперимента.

Расстояние от центра частицы почвы до плоскости треугольника найдем по формуле:

$$C_o = \frac{|cA[i]x + cB[i]y + cC[i]z + cD[i]|}{\sqrt{cA[i]^2 + cB[i]^2 + cC[i]^2}}, \quad (4)$$

В числителе находится скалярное произведение вектора нормали и вектора от любой точки плоскости до центра частицы, плюс свободный член. В знаменателе – длина нормали (\vec{N} – нормализующий результат). В рассматриваемом случае $\vec{N} = 1$, то есть имеем нормализованную нормаль, поэтому формула (4) примет вид

$$C_o = cA[i]x + cB[i]y + cC[i]z + cD[i] \quad (5)$$

Величина C_o может быть как положительной так и отрицательной, в зависимости от того, с какой стороны плоскости находится частица почвы, поэтому для определения абсолютного расстояния берем её по модулю.

В таком случае условие контакта частицы почвы с орудием примет вид:

$$|C_o| < q \quad (6)$$

где $q=0,5D$, эквивалент радиусу частицы, выраженные через основной параметр D , м.

Таким образом, если расстояние от центра частицы до плоскости меньше половины её диаметра, то частица пересекает плоскость, что означает её контакт.

Движение частиц рассчитаем, используя явный метод Эйлера. Для определения положения используем формулу:

$$x = x + v_x \cdot dt + \frac{F_x}{m} \cdot \frac{dt^2}{2}, \quad (7)$$

Аналогично рассчитаем компоненты y и z .

В модели учтем когезионные свойства почвы. В реальной почве её частицы удерживаются вместе за счет физических взаимодействий друг с другом. В нашем случае примем допущение считать, что частицы считаются «связанными», если они находятся близко друг к другу, а разрыв этих связей будет имитировать разрушение структуры почвы под механическим воздействием орудия.

Для реализации такого подхода создадим массив Kle , который будет хранить информацию о связях между частицами. Для каждой частицы p в нем запишем индексы других частиц h , с которыми она связана «список соседей», но с учетом когезионных свойств. При инициализации связи между частицами определим на основе их расстояния. Если расстояние между центрами двух частиц r_{ph} меньше или равно пороговому значению, то они считаются связанными. Таким образом, условие связи примет вид:

$$r_{ph} = \sqrt{(x_p - x_h)^2 + (y_p - y_h)^2 + (z_p - z_h)^2} \leq D \cdot 1,05, \quad (8)$$

где (x_p, y_p, z_p) и (x_h, y_h, z_h) – координаты частиц p и h .

Порог 1,05 – коэффициент растяжения, который позволяет считать частицы связанными когезионными свойствами, когда они касаются друг друга или чуть дальше друг друга. То есть, он позволяет учитывать небольшую деформацию почвы без разрыва. Если происходит превышение этого порога, то связи разрываются и когезионные свойства между почвой больше не действуют. На каждом шаге имитационной модели проверяется расстояние между связанными частицами, записанными в массиве Kle и если $r_{ph} > D \cdot 1,05$, то связь удаляется из этого массива.

Введем в модель коэффициенты, которые будут оценивать деформацию почвы, вызванную орудием. Коэффициент переворачивания определим как долю частиц, которые изменили свое положение относительно исходной структуры (поднялись выше определенного уровня z) или потеряли связи с нижними слоями. Зададим ограничения в области работы орудия, для рассматриваемого случая

$$x \in [1.65, 1.9], y \in [0.3, 0.9], z \geq 0.2. \quad (9)$$

Частицы в указанной области почвы пометим как принадлежащие нижнему слою. Вычислим среднюю высоту r этих частиц по оси Z . Тогда частицы выше r маркируются как верхних слой. На каждом шаге имитации определяется новая высота для частиц в указанной области, и подсчитывается число частиц j , сменивших положение относительно r из нижнего слоя в верхний и наоборот. Таким образом, коэффициент оборачиваемости пласта примет вид

$$K_{ob} = \frac{j}{k} \cdot 100, \quad (10)$$

где k – общее число частиц в рассматриваемой области, шт.;

j – число частиц, изменивших положение, шт.

Введем коэффициент разрушения почвы K_{rnp} , который будет оценивать степень сохранения структуры верхнего слоя почвы ($z > 0,31$) в той же области ($x \in [1.65, 1.9]$, $y \in [0.3, 0.9]$). Значение 1 указывает на полное сохранение связей, а значение 0 на их полное разрушение. При инициализации частицы верхнего слоя $z > 0,31$ маркируем как $g=1$, а начальное число связей N_{GSKL0} в верхнем слое устанавливаем, как сумму из массива $Kle[i, 0]$ для частиц с $g=1$. На каждом шаге пересчитываем число связей N_{GSKL1} для частиц верхнего слоя и рассчитываем коэффициент измельчения почвы по формуле

$$K_{rnp} = \left(1 - \frac{N_{GSKL1}}{N_{GSKL0}}\right) \cdot 100, \quad (11)$$

Таким образом, K_{rnp} представляет собой отношение текущего числа связей к начальному, демонстрирует, насколько орудие разрушает когезионную структуру верхнего слоя почвы.

Коэффициент полноты рыхления почвы рассчитаем по формуле

$$K_{np} = 100 - \frac{N_{GSKL1}}{N_{GSKL0}} \cdot 100, \quad (12)$$

Он показывает долю разрушенных связей в области действия орудия.

Сила сопротивления движению орудия F_x является ключевым параметром при проектировании и оптимизации. Она отражает энергию, необходимую для преодоления сопротивления почвы, и зависит от структуры почвы, геометрии орудия и скорости движения. В методе дискретных элементов DEM F_x моделируется как результат взаимодействия множества дискретных частиц почвы с поверхностью инструмента.

Сила сопротивления F_x определяется как проекция суммарной силы взаимодействия между частицами почвы и орудием на ось x , которая совпадает с направлением движения орудия. В реальных условиях эта сила складывается из сил трения между частицами и поверхностью орудия, сил сопротивления деформации почвы и сил, связанных с разрывом

когезионных связей. Мы используем подход методик DEM, когда эти взаимодействия упрощены до парного контакта между сферическими частицами и поверхностью орудия, представленного набором треугольных граней. Диаметр дискретных элементов почвы примем равным 35 мм, число дискретных элементов 80 000, шаг времени 0,0007 с, время моделирования 0,5607 с. При таких параметрах расчет одного вычислительного эксперимента на современном процессоре таком как Ryzen 5 5600X с частотой 3,7 ГГц займет порядка 14 минут.

При выполнении условия контакта орудия с частицей почвы $|C_0| < q$, силу сопротивления рассчитаем по формуле

$$F = k \cdot (q - |C_0|) \quad (13)$$

где k – коэффициент жесткости для силы, направленной вдоль нормали $cA[i], cB[i], cC[i]$

При нахождении силы F_x , затрачиваемой орудием необходимо учитывать суммирование вкладов для каждого контакта между частицами почвы и треугольниками, на которые разбита модель орудия, в этом случае формула примет вид

$$F_x = F_x + F \cdot cA[i] \quad (14)$$

где $cA[i]$ – компонента нормали по X.

$cA[i] = (y_2 - y_1) \cdot (z_3 - z_1) - (z_2 - z_1) \cdot (y_3 - y_1)$
 $y_1, y_2, y_3, z_1, z_2, z_3$ – координаты соответствующих вершин треугольников, на которые разбито орудие.

Результаты и их обсуждение

Орудие представлено в модели в виде совокупности множества элементарных треугольных поверхностей (рисунок 1). Треугольники, образующие дисковые плуги, вращались под действием набегающей почвы относительно осей плугов. Режущий каток также вращался в соответствии с перемещением его ножей по поверхности почвы.

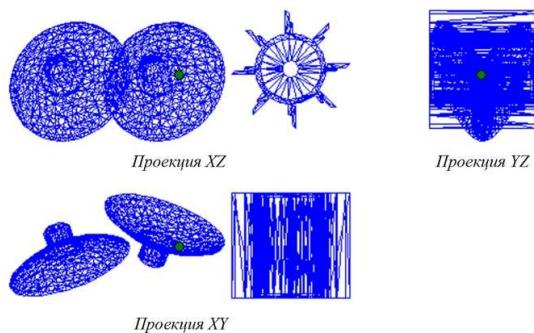


Рисунок 1. Проекции комбинированного орудия в модели

Figure 1. Projections of the combined weapon in the model^o

Источник: собственное фото авторов

Source: authors' own photo

На рисунке 2 приведен пример обработки почвы для первого набора параметров комбинированного орудия. На проекции XY отчетливо видны углубления, оставляемые ножами режущего катка, а также выраженная борозда после прохода комбинированного орудия.

При решении задачи оптимизации использовали следующие факторы:

a – величина заглубления режущего катка в почву (положительные значения a соответствуют заглублению цилиндрической поверхности катка ниже уровня почвы, в частности, в результате нагружения катка; отрицательные значения a соответствуют специально обеспечиваемому техническими средствами подъему цилиндрической поверхности катка над уровнем почвы); d – боковое смещение

Пример снимаемых данных для первого опыта по обработке почвы комбинированным орудием в компьютерном эксперименте показан на рисунке 2.

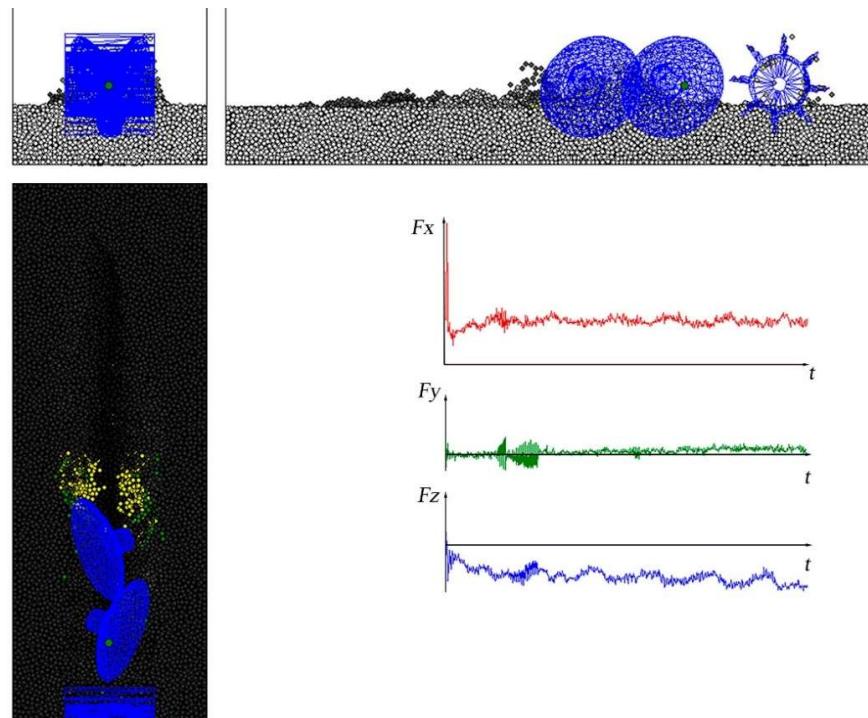


Рисунок 2. Пример снимаемых данных для первого опыта по обработке почвы комбинированным орудием в компьютерном эксперименте

Figure 2. An example of the data taken for the first experiment on soil cultivation with a combined tool in a computer experiment

Источник: собственное фото авторов

Source: authors' own photo

нижних точек плугов относительно центра борозды (положительные значения d соответствуют раздвижению дисков вбок); φ – угол атаки дисковых плугов.

Критериями оптимизации являлись: K_{np} – коэффициент полноты рыхления почвы; K_{ob} – коэффициент оборачиваемости пласта; K_{rnp} – коэффициент измельчения напочвенного покрова; F_x – сила сопротивления движению орудия.

В процессе оптимизации фактор a варьировали в диапазоне $-5 \dots 5$ см, фактор d – в диапазоне $-5 \dots 5$ см, фактор φ – в диапазоне $15 \dots 30^\circ$.

Задачу оптимизации аналитически представим как:

$$\begin{cases} K_{np}(a, d, \varphi) \rightarrow \max; \\ K_{ob}(a, d, \varphi) \rightarrow \max; \\ K_{rnp}(a, d, \varphi) \rightarrow \max; \\ F_x(a, d, \varphi) \rightarrow \min; \end{cases} \Rightarrow a^{\text{опт}}, d^{\text{опт}}, \varphi^{\text{опт}}. \quad (15)$$

На рисунке 3 приведены результаты отображение рабочих органов и почвы для всех двадцати компьютерных экспериментов.

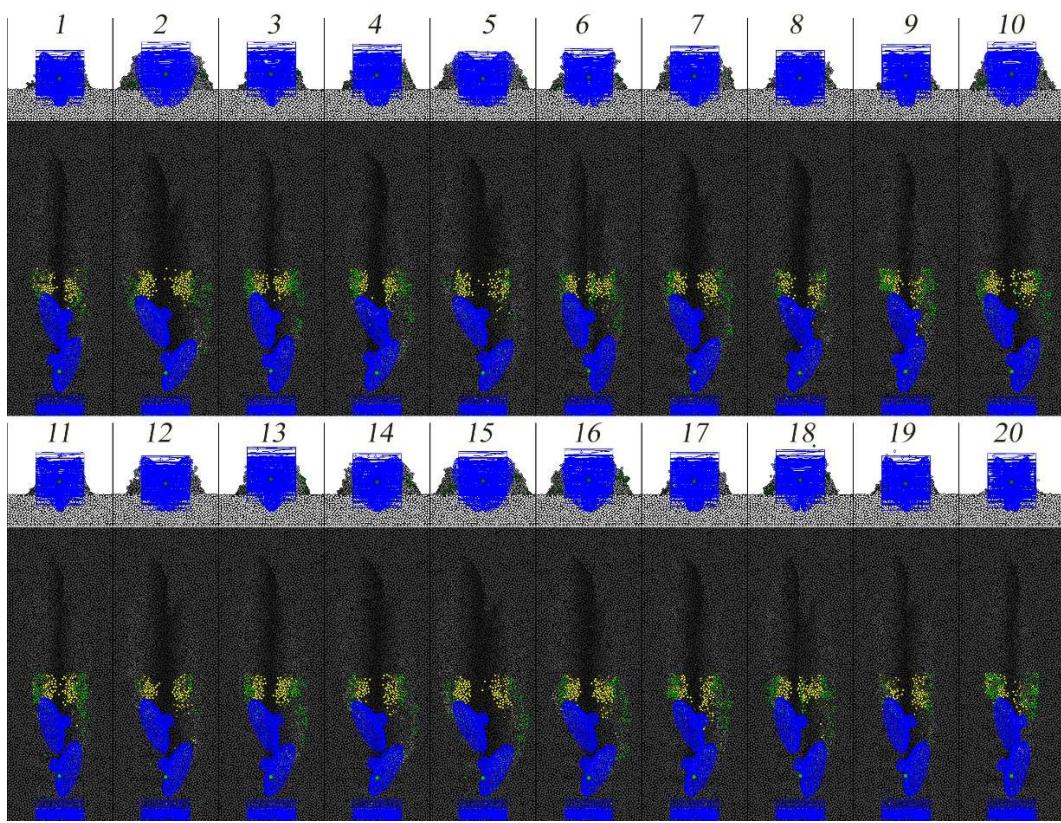


Рисунок 3. Вид спереди и сверху для двадцати проведённых компьютерных экспериментов

Figure 3. Front and top views of twenty computer experiments conducted

Источник: собственное фото авторов

Source: authors' own photo

На рисунке 4 приведены результаты оптимизации – проекции областей факторного пространства (a, d, φ).

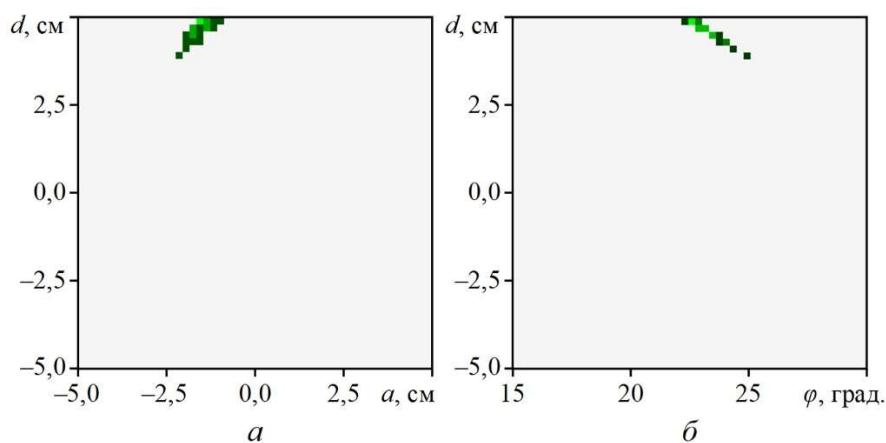


Рисунок 4. Проекции оптимальных областей факторного пространства (a, d, φ)

Figure 4. Projections of optimal regions of factor space (a, d, φ)

Источник: собственное фото авторов

Source: authors' own photo

Входные и выходные данные для двадцати проведенных компьютерных экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты компьютерных экспериментов для оптимизации параметров комбинированного орудия «режущий каток + 2 дисковых плуга»

Table 1

Results of computer experiments for optimization of parameters of combined tool «cutting roller + 2 disc plows»

Номер опыта Experience number	Заглубление катка a , см Roller depth a , cm	Боковая дистанция между дисками d , см Lateral distance between discs d , cm	Угол установки дисков φ , ° Disc installation angle φ , °	Коэффициент полноты рыхления K_{np} , % Coefficient of completeness of loosening Kr, %	Коэффициент обработываемости пласта K_{ob} , % Formation turnover ratio K_{ob} , %	Коэффициент измельчения напочв. покрова K_{mp} , % Ground cover crushing coefficient K_{mp} , %	Сила сопротивления движению орудия F_x , Н Resistance force to gun movement F_x , N
1	4,9	-2,8	19,8	54,94	30,55	52,82	4761
2	-4,9	5,0	29,9	79,93	21,73	57,50	5013
3	-5,0	0,4	15,1	44,90	22,99	46,15	2656
4	-2,5	-5,0	29,9	54,67	26,61	48,24	4127
5	5,0	4,6	29,9	82,66	27,56	56,60	6747
6	2,5	5,0	15,0	64,49	26,30	51,41	4262
7	-0,3	1,4	23,5	65,05	25,51	53,41	4288
8	4,7	-5,0	30,0	63,72	29,61	57,12	5715
9	-1,7	-5,0	19,5	45,81	24,72	45,10	3150
10	-4,8	5,0	20,9	71,42	23,15	55,76	3904
11	0,7	-0,6	15,0	45,83	21,89	48,03	3338
12	5,0	2,7	21,8	70,80	28,35	53,98	5610
13	-5,0	-1,6	24,3	51,98	24,57	49,74	3343
14	2,4	-0,2	30,0	69,10	27,87	51,14	5325

15	0,0	4,9	28,9	80,73	23,46	58,84	5524
16	-2,6	0,5	30,0	67,66	25,67	53,26	4572
17	1,2	-3,7	25,1	52,74	28,35	50,96	4131
18	-2,2	4,3	15,1	59,64	25,51	51,59	3383
19	5,0	0,9	15,5	59,29	29,92	52,43	4878
20	2,4	-4,9	15,0	48,56	23,46	45,86	3679

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

Выводы

Для комбинированного орудия «режущий каток + 2 дисковых плуга» оптимальная величина заглубления катка минус 2 ... минус 1 см (то есть, цилиндрическая поверхность катка должна быть немного приподнята над напочвенным покровом), оптимальная величина бокового раздвижения дисковых плугов 4 ... 5 см (то есть, плуги должны быть немного смещены друг от друга вбок), оптимальный угол атаки дисковых плугов 22 ... 24°. При этом комбинированное орудие обеспечивает коэффициент полноты рыхления более 60 %, коэффициент оборачиваемости пласта более 24 %, коэффициент измельчения напочвенного покрова более 56 %, силу сопротивления движению орудия менее 4800 Н.

Разработанная нами DEM-модель, позволяет определить инженерные «окна» настроек комбинированно орудия «режущий каток + 2 дисковых плуга». Был использован многокритериальный подход с приоритетами, который позволяет установить баланс, при котором, не превышая тяговое ограничение F_x значения $K_{\text{пр}}$, $K_{\text{об}}$, $K_{\text{трп}}$ были бы максимальны. Это демонстрирует компромиссный характер задачи. Выбор делается не по одному экстремуму, а по зоне параметров, где одновременно выполняются требования целевых функций. Выставляемые на орудии параметры (a , d , φ) не требуют специального инструмента и доступны к регулировки штатными средствами.

Список литературы

1. Aldoshin N., Mamatov F., Ismailov I., Ergashov G. Development of combined tillage tool for melon cultivation. 19th international scientific conference engineering for rural development Proceedings. 2020; 19. DOI: 10.22616/ER-Dev.2020.19.TF175
2. Zhirnov A. Construction of active working machines for the care of seedlings. Proceedings of the XXXVIII International Multidisciplinary Conference «Recent Scientific Investigation». Primedia E-launch LLC. Shawnee, USA. 2022. DOI: 10.32743/UsaConf.2022.11.38.346741
3. Kalinin A.B., Novikov M.A., Ruzhev V.A., Teplinsky I.Z. Improving the efficiency of the soil uncompaction by the cultivator-subsoiler through the use of digital systems for working depth control. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 2021; 723:032061. DOI: 10.1088/1755-1315/723/3/032061
4. Balabanov V., Lee A., Norov B., Khudaev I., Egorov V. Investigation of various options for processing gray forest soil in a field crop rotation. E3S Web of Conferences. "International Scientific Conference "Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering, Conmechhydro 2021". 2021; 04025. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126404025>
5. Малюков С. В., Лысич М. Н., Бухтояров Л. Д., Поздняков Е. В., Гнусов М. А., Шавков М. В., Петков А. Ф. Анализ дисковых рабочих органов лесных почвообрабатывающих орудий. Лесотехнический журнал. 2023; 2(50):128-141. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/7. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54525087>
6. Малюков С.В., Бухтояров Л.Д., Лысич М.Н., Шавков М.В., Поздняков Е.В., Петков А.Ф. Метод динамики частиц: моделирование комбинированного почвообрабатывающего орудия, применяемого при лесовосстановлении и защите леса. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023; 245:215-234. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.215-234. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54768956>
7. Aikins K.A., Ucgul M., Barr J.B., Awuah E., Antille D.L., Jensen T.A., Desbiolles J.M.A. Review of Discrete Element Method Simulations of Soil Tillage and Furrow Opening. Agriculture. 2023; 13: 541. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030541>
8. Yan, D.; Yu, J.; Wang, Y.; Zhou, L.; Tian, Y.; Zhang, N. Soil Particle Modeling and Parameter Calibration Based on Discrete Element Method. Agriculture. 2022; 12: 1421. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12091421>
9. Ma X., You Y., Yang D., Wang D., Hui Y., Li D., Wu H. Calibration and Verification of Discrete Element Parameters of Surface Soil in Camellia Oleifera Forest. Agronomy. 2024; 14: 1011. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14051011>
10. Zhao H., Huang Y., Liu Z., Liu W., Zheng Z. Applications of Discrete Element Method in the Research of Agricultural Machinery: A Review. Agriculture. 2021; 11: 425. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11050425>
11. Ahmad F., Qiu B J., Ding Q S., Ding W M., Khan Z M., Shoaib M., et al. Discrete element method simulation of disc type furrow openers in paddy soil. Int J Agric & Biol Eng. 2020; 13(4): 103–110. Open Access at URL: <https://www.ijabe.org>
12. Nelson R. M., Changying Ji, Ian T. Prediction of cutting forces and soil behavior with discrete element simulation, Computers and Electronics in Agriculture. 2020; 179: 105848, ISSN 0168-1699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105848>
13. Tienan Z., Zhou H., Ji J., Sun F., Qin Z. Parameter calibration of the discrete element simulation model for soaking paddy loam soil based on the slump test. PLoS ONE. 2023. 18(6): e0285428. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285428>
14. Zhang J., Xia, M., Chen W., Yuan D., Wu C., Zhu, J. Simulation Analysis and Experiments for Blade-Soil-Straw Interaction under Deep Ploughing Based on the Discrete Element Method. Agriculture. 2023; 13: 136. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13010136>
15. Yin L., Guo A., Liu C., Guo M., Yang D., Gao X., Wu H. Design and Discrete Element (DEM) Simulation Analysis of Grassland Ecological Cleaning and Restoration Vehicle. Machines. 2025. 13: 114. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines13020114>

16. Wu J., Shen Y., Yang S., Feng Z. Simulation of Track-Soft Soil Interactions Using a Discrete Element Method. *Appl. Sci.* 2022; 12: 2524. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12052524>
17. Zhao Z., Wang D., Shang S., Hou J., He X., Gao Z., Xu N., Chang Z., Guo P., Zheng X. Analysis of Cyperus esculentus–Soil Dynamic Behavior during Rotary Tillage Based on Discrete Element Method. *Agriculture*. 2023; 13: 358. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13020358>
18. Walunj A., Chen Y., Tian Y., Zeng Z. Modeling Soil–Plant–Machine Dynamics Using Discrete Element Method: A Review. *Agronomy*. 2023. 13: 1260. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13051260>
19. Zeng Zhiwei, Ma Xu, Chen Ying, Qi Long. Modelling residue incorporation of selected chisel ploughing tools using the discrete element method (DEM). *Soil and Tillage Research*. 2020. 197: 104505. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104505>
20. Tian Y., Zeng Z., Xing Y. A Review of Discrete Element Method Applications in Soil–Plant Interactions: Challenges and Opportunities. *Agriculture*. 2024. 14: 1486 . DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14091486>

References

1. Aldoshin N., Mamatov F., Ismailov I., Ergashov G. Development of combined tillage tool for melon cultivation. 19th international scientific conference engineering for rural development Proceedings. 2020;19. DOI: 10.22616/ER-Dev.2020.19.TF175
2. Zhirnov A. Construction of active working machines for the care of seedlings. Proceedings of the XXXVIII International Multidisciplinary Conference «Recent Scientific Investigation». Primedia E-launch LLC. Shawnee, USA. 2022. DOI:10.32743/UsaConf.2022.11.38.346741
3. Kalinin A.B., Novikov M.A., Ruzhev V.A., Teplinsky I.Z. Improving the efficiency of the soil uncompaction by the cultivator-subsoiler through the use of digital systems for working depth control. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 2021;723:032061. DOI: 10.1088/1755-1315/723/3/032061
4. Balabanov V., Lee A., Norov B., Khudaev I., Egorov V. Investigation of various options for processing gray forest soil in a field crop rotation. E3S Web of Conferences. "International Scientific Conference "Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering, Conmechhydro 2021". 2021;04025. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126404025>.
5. Malyukov S. V., Lysych M. N., Buhtoyarov L. D., Pozdnyakov E. V., Gnusov M. A., Shavkov M. V., Petkov A. F. Analiz diskovyh rabochih organov lesnyh pochvoobrabatyvayushchih orudij. [Analysis of disk working bodies of forest soil-cultivating implements]. Lesotekhnicheskii zhurnal = Forestry Engineering journal. 2023 2 (50): 128-141. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/7> URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54525087>
6. Malyukov S. V., Bukhtoyarov L. D., Lysych M. N., Shavkov M. V., Pozdnyakov E. V., Petkov A. F. Metod dinamiki chastic: modelirovanie kombinirovannogo pochvoobrabatyvajushhego orudija, primenjaemogo pri lesovostanovlenii i zashchite lesa [Particle dynamics method: simulation of a combined tillage tool used in reforestation and forest protection]. Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii = Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy. 2023; 245: 215-234. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.215-234 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54768956>
7. Aikins K.A., Ucgul M., Barr J.B., Awuah E., Antille D.L., Jensen T.A., Desbiolles J.M.A. Review of Discrete Element Method Simulations of Soil Tillage and Furrow Opening. *Agriculture*. 2023; 13: 541. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13030541>
8. Yan D., Yu J., Wang Y., Zhou L., Tian Y., Zhang N. Soil Particle Modeling and Parameter Calibration Based on Discrete Element Method. *Agriculture*. 2022; 12: 1421. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12091421>
9. Ma X., You Y., Yang D., Wang D., Hui Y., Li D., Wu H. Calibration and Verification of Discrete Element Parameters of Surface Soil in Camellia Oleifera Forest. *Agronomy*. 2024; 14: 1011. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14051011>

10. Zhao H., Huang Y., Liu Z., Liu W., Zheng Z. Applications of Discrete Element Method in the Research of Agricultural Machinery: A Review. *Agriculture*. 2021; 11: 425. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11050425>
11. Ahmad F, Qiu B J, Ding Q S, Ding W M, Khan Z M, Shoib M, et al. Discrete element method simulation of disc type furrow openers in paddy soil. *Int J Agric & Biol Eng.* 2020; 13(4): 103–110. Open Access at URL: <https://www.ijabe.org>
12. Nelson R. M., Changying Ji, Ian T. Prediction of cutting forces and soil behavior with discrete element simulation, Computers and Electronics in Agriculture. 2020; 179: 105848, ISSN 0168-1699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105848>
13. Tienan Z, Zhou H, Ji J, Sun F, Qin Z. Parameter calibration of the discrete element simulation model for soaking paddy loam soil based on the slump test. *PLoS ONE*. 2023. 18(6): e0285428. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285428>
14. Zhang J., Xia, M., Chen W., Yuan D., Wu C., Zhu, J. Simulation Analysis and Experiments for Blade-Soil-Straw Interaction under Deep Ploughing Based on the Discrete Element Method. *Agriculture*. 2023; 13: 136. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13010136>
15. Yin L., Guo A., Liu C., Guo M., Yang D., Gao X., Wu H. Design and Discrete Element (DEM) Simulation Analysis of Grassland Ecological Cleaning and Restoration Vehicle. *Machines*. 2025. 13: 114. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines13020114>
16. Wu J., Shen Y., Yang S., Feng Z. Simulation of Track-Soft Soil Interactions Using a Discrete Element Method. *Appl. Sci.* 2022; 12: 2524. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12052524>
17. Zhao Z., Wang D., Shang S., Hou J., He X., Gao Z., Xu N., Chang Z., Guo P., Zheng X. Analysis of Cyperus esculentus–Soil Dynamic Behavior during Rotary Tillage Based on Discrete Element Method. *Agriculture*. 2023; 13: 358. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13020358>
18. Walunj A., Chen Y., Tian Y., Zeng Z. Modeling Soil–Plant–Machine Dynamics Using Discrete Element Method: A Review. *Agronomy*. 2023. 13: 1260. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13051260>
19. Zeng Zhiwei, Ma Xu, Chen Ying, Qi Long. Modelling residue incorporation of selected chisel ploughing tools using the discrete element method (DEM). *Soil and Tillage Research*. 2020. 197: 104505. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104505>
20. Tian Y., Zeng Z., Xing Y. A Review of Discrete Element Method Applications in Soil–Plant Interactions: Challenges and Opportunities. *Agriculture*. 2024. 14: 1486 . DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14091486>

Сведения об авторах

 *Бухтояров Леонид Дмитриевич* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7428-0821>, e-mail: vglta-mlx@yandex.ru

Лысыч Михаил Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>, e-mail: miklynea@yandex.ru

Малюков Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2098-154X>, e-mail: malyukovsergey@yandex.ru

Information about authors

✉ *Leonid D. Bukhtoyarov* – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7428-0821>, e-mail: vglta-mlx@yandex.ru

Mikhail N. Lysych – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>, e-mail: miklynea@yandex.ru

Sergey V. Malyukov – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation; 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2098-154X>, e-mail: malyukovsergey@yandex.ru

✉ – Для контактов/Corresponding author