

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/22>

УДК 630\*311.2:631.331.82



## **Оптимизация параметров уплотняющих катков лесной сажалки для почв Центральной России на основе дискретно-элементного моделирования**

Максим А. Гнусов<sup>1</sup>, [mgnusov@ya.ru](mailto:mgnusov@ya.ru), 0000-0003-1653-4595

Денис Ю. Дручинин<sup>1</sup>, [druchinin.denis@rambler.ru](mailto:druchinin.denis@rambler.ru), 0000-0003-2128-2687

Александр В. Школьных<sup>1</sup> , [alex.hk525@gmail.com](mailto:alex.hk525@gmail.com), 0009-0002-3311-5907

Михаил Н. Лысыч<sup>1</sup>, [miklynea@yandex.ru](mailto:miklynea@yandex.ru), 0000-0002-3764-3873

<sup>1</sup>*Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация*

Актуальность проектирования уплотняющих катков лесных сажалок обусловлена отсутствием универсальной методики выбора их параметров для конкретных почвенно-климатических условий, что приводит к неоптимальным режимам работы, снижающим приживаемость семян и повышающим энергозатраты. Целью работы являлась разработка методики параметрического анализа и оптимизации системы уплотняющих катков на основе дискретно-элементного моделирования (DEM). Для этого был применен метод компьютерного моделирования с использованием разработанного специализированного программного комплекса, учитывающего взаимодействие почвенных частиц между собой и с поверхностями катков. Серией вычислительных экспериментов для типичных лесных почв Центральной России установлены оптимальные значения параметров: просвет между катками 0,09–0,11 м обеспечивает плотность почвы в борозде 1,59 г/см<sup>3</sup>; угол наклона катка 15–20° формирует высоту бугорка над бороздой 20–21 мм; продольное смещение наклонного катка на –0,1 м относительно опорного снижает силу сопротивления движению до 688 Н. Практическим результатом является создание инструмента для научно обоснованного проектирования рабочих органов, внедрение которого позволит повысить качество лесовосстановления при снижении эксплуатационных затрат.

**Ключевые слова:** *дискретно-элементное моделирование, лесная сажалка, уплотняющие катки, параметрический анализ, оптимизация параметров, почвенная среда, сила сопротивления, плотность почвы, компьютерное моделирование, лесопосадочная техника*

**Финансирование:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00876, <https://rscf.ru/project/25-19-00876/>.

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Оптимизация параметров уплотняющих катков лесной сажалки для почв Центральной России на основе дискретно-элементного моделирования / М.А. Гнусов, Д.Ю. Дручинин, А.В. Школьных, М. Н. Лысыч // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 368-386. – Библиогр.: с. 382-385 (24 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/22>.

*Поступила 01.06.2025. Пересмотрена 15.11.2025. Принята 30.11.2025. Опубликовано онлайн 26.12.2025.*

Article

## **Optimization of the parameters of compacting rollers of the forest planter for soils of Central Russia based on discrete-element modelling**

**Maxim A. Gnusov**<sup>1</sup>, mgnusov@ya.ru,  0000-0003-1653-4595

**Denis Yu. Druchinin**<sup>1</sup>, druchinin.denis@rambler.ru,  0000-0003-2128-2687

**Alexander V. Shkolnykh**<sup>1</sup>✉, alex.hk525@gmail.com,  0009-0002-3311-5907

**Mikhail N. Lysych**<sup>1</sup>, miklynea@yandex.ru,  0000-0002-3764-3873

<sup>1</sup> Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev st., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

### **Abstract**

The relevance of designing compacting rollers for forest planters is due to the lack of a universal methodology for selecting their parameters for specific soil and climatic conditions, which leads to inoptimal operating modes that reduce seedling survival and increase energy consumption. The purpose of the research was to develop a methodology for parametric analysis and optimization of the compaction roller system based on discrete-element modeling (DEM). For this purpose, a computer modeling method was used using the developed specialized software package that takes into account the interaction of soil particles with each other and with the surface of the rollers. The optimal parameter values have been revealed by a series of computational experiments for typical forest soils of Central Russia: a gap between the rollers of 0.09-0.11 m ensures soil density in the furrow of 1.59 g/cm<sup>3</sup>; a roller inclination angle of 15-20° forms a bump height above the furrow of 20-21 mm; a longitudinal displacement of the inclined roller by -0.1 m relative to the support roller reduces the resistance force to movement to 688 H. The practical result is the creation of a tool for scientifically based design of working bodies, the implementation of which will improve the quality of forest reforestation while reducing operating costs.

**Keywords:** *discrete-element modeling, forest planter, compacting rollers, parametric analysis, parameter optimization, soil environment, resistance force, soil density, computer modeling, forest planting equipment*

**Funding:** The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 25-19-00876, <https://rscf.ru/project/25-19-00876/>.

**Acknowledgments:** The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of the article.

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Gnusov M.A., Druchinin D.Yu., Shkolnykh A.V., Lysych M.N. (2025) Optimization of the parameters of compacting rollers of the forest planter for soils of Central Russia based on discrete-element modelling. Forestry Engineering journal. Vol. 15, No. 4 (60), pp. 368-386 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/22>.

**Received** 01.06.2025. **Revised** 15.11.2025. **Accepted** 30.11.2025. **Published online** 26.12.2025.

## Введение

**Актуальность.** Проектирование уплотняющих катков лесных сажалок традиционно основывается на эмпирических подходах, что не позволяет оптимально учитывать почвенно-климатические условия и приводит к неудовлетворительным агротехническим показателям. Отсутствие комплексной методики параметрического анализа системы «уплотняющие катки – почвенная среда» обуславливает необходимость разработки новых подходов на основе современных методов компьютерного моделирования, таких как метод дискретных элементов (DEM).

## Обзор литературы

Проблема оптимизации параметров почвообрабатывающих органов является предметом интенсивных исследований в области сельскохозяйственного и лесохозяйственного машиностроения. В работе Aikins et al. [1] подробно исследовано трехмерное дискретно-элементное моделирование процесса обработки почвы, где определены подходящие контактные модели и параметры для сыпучих грунтов. Значительный вклад в развитие методов оптимизации рабочих органов внесли Ye et al. (2023) [2], разработавшие методику оптимизации параметров сошника сеялки на основе дискретно-элементного моделирования.

Важным аспектом является калибровка DEM-параметров для различных состояний почвы. Исследования Li, Tang и Wang (2023) [3] предложили методику калибровки параметров дискретных элементов для почвы в разных состояниях уплотнения, в то время как Walunj, A. Et al. (2025) [4] посвятили свои работы DEM-моделированию взаимодействия почвы с рабочими органами под влиянием влажности.

В области лесного хозяйства Yeşilkaya et al. (2025) [5] провели анализ современных методов математического моделирования при проектировании лесопосадочной техники, выделив перспективность применения DEM-подхода.

Экспериментальные исследования Fu et al. (2019) [6] подтвердили значительное влияние конфигурации катков на распределение плотности почвы в корневой зоне сеянцев. Методология

калибровки DEM-параметров для лесных грунтов представлена в работе Ma et al. (2024) [7].

При рассмотрении альтернативных подходов к моделированию следует отметить исследования López-Bravo et al. (2019) [8], продемонстрировавшие возможности трехмерного DEM-моделирования для оценки уплотнения почвы сельскохозяйственной техникой. Ну и др. (2023) [9] предложили альтернативный подход с использованием гидродинамики сглаженных частиц (SPH), а Bradley, Jaksa и Kuo (2024) [10] применили метод конечных элементов для анализа отклика грунта при динамическом катковании.

Современные методы оценки уплотнения почвы с использованием дистанционного зондирования рассмотрены в исследовании Kim и др. (2025) [11]. Ghaffariyan (2021) [12] провел обзор производительности механизированной посадки деревьев, а Раднаев, (2022) [13] исследовали процесс взаимодействия уплотняющих катков с почвой методом дискретных элементов.

Перспективным направлением является создание полуавтоматических посадочных механизмов для сеянцев с закрытой корневой системой. Лысыч и др. (2025) [14] представили инновационный подход к проектированию с использованием комплексной методики, включающей проектирование в среде САПР с полноразмерным макетированием средствами 3D-печати. Черник и Елисеев (2025) [15] обосновали рабочую скорость лесопосадочной машины для сеянцев с закрытой корневой системой.

В международном исследовании Song и др. (2025) [16] рассматриваются перспективные методы построения динамических моделей почвы для интеллектуального земледелия. Charuk, Gawdzińska и Dunaj (2024) [17] демонстрируют применение метода конечных элементов для анализа динамического отклика конструкционных материалов. Reza и др. (2021) [18] предложили кинематический анализ шестирядного самоходного посадочного механизма.

Практические аспекты оптимизации почвообрабатывающих орудий отражены в работе Малюкова и др. (2025) [19], где решена задача оптимизации параметров комбинированного орудия

для сплошной обработки почвы. Разработке специализированного программного обряда авторов [20, 21], представивших программы для моделирования процесса взаимодействия рабочих органов с почвенно-растительной средой.

Трегубов и др. (2022) [22] обобщили опыт создания лесных культур с закрытой корневой системой в степной и лесостепной зонах юга Российской Федерации, что имеет важное значение для оценки эффективности работы лесопосадочной техники в различных почвенно-климатических условиях.

Проведенный анализ литературных источников выявил существенный пробел в области научного обоснования параметров уплотняющих катков лесных сажалок. Несмотря на активное развитие методов дискретно-элементного моделирования в исследованиях почвообрабатывающих орудий, до настоящего времени отсутствует комплексная методика, позволяющая оптимизировать взаимосвязанное влияние ключевых конструктивных параметров катков на конфликтующие выходные характеристики процесса - качество заделки борозды и энергозатраты. Существующие подходы носят фрагментарный характер и не учитывают совокупного воздействия таких параметров, как просвет между катками, угол их наклона и продольное смещение, на формирование почвенного профиля и силовые показатели. Кроме того, отсутствуют специализированные программные решения, адаптированные для параметрического анализа именно системы уплотняющих катков лесных сажалок.

В связи с выявленными пробелами целью настоящего исследования является разработка методики параметрического анализа и оптимизации системы уплотняющих катков на основе дискретно-элементного моделирования. Для достижения этой цели предполагается создать специализированный программный комплекс, позволяющий проводить комплексное моделирование взаимодействия катков с почвенной средой, установить количественные зависимости между конструктивными параметрами и выходными характеристиками процесса, а также определить оптимальные значения параметров для

типичных лесных почв центрального региона России, обеспечивающие баланс между качеством заделки борозды и энергетическими показателями.

### **Материалы и методы**

#### **Методы исследования**

Для оптимизации параметров уплотняющих катков применен метод дискретных элементов (Discrete Element Method). Почвенная среда представлена совокупностью сферических частиц с заданными физико-механическими характеристиками. Взаимодействие между частицами и их контакт с поверхностями катков описывается системой дифференциальных уравнений на основе второго закона Ньютона. Данный подход доказал свою эффективность при моделировании сложных почвообрабатывающих органов [3, 17]. Для реализации модели разработано специализированное программное обеспечение на Object Pascal, обеспечивающее визуализацию процесса и расчет показателей эффективности.

#### **Объект и предмет исследования**

Объектом исследования выступил процесс параметрического анализа системы уплотняющих катков лесной сажалки методом дискретно-элементного моделирования.

Целью компьютерного моделирования являлось установление количественных зависимостей между конструктивными параметрами катков и выходными характеристиками технологического процесса для последующей оптимизации.

К выходным характеристикам процесса, определяющим его эффективность, отнесены:

- параметры качества уплотнения: распределение плотности почвы в поперечном сечении борозды ( $\rho$ ) и высота формируемого над бороздой почвенного валика ( $h$ );
- энергетический показатель: сила сопротивления движению орудия ( $F_x$ ).

Варьируемыми конструктивными параметрами катков являлись:

- зазор между катками ( $\Delta y$ );
- угол наклона рабочей поверхности наклонного катка ( $\alpha$ );
- продольное смещение наклонного катка относительно опорного ( $\Delta x$ ).

Моделирование выполнялось для условий типичных суглинистых лесных почв центрального региона России с влажностью 18-22%, объемным модулем упругости  $E = 8-12$  МПа и плотностью в естественном залегании  $1.35-1.45$  г/см<sup>3</sup> [4].

Для теоретического исследования процесса заполнения борозды разработана математическая модель, обеспечивающая высокую физическую и геометрическую адекватность. Модель детально воспроизводит:

- геометрию уплотняющих катков;
- кинематику их поступательного и вращательного движения;
- распределение плотности почвы в борозде.

В основу модели положена ранее разработанная авторами дискретно-элементная

модель почвы [22-24], в которой почвенная среда аппроксимирована совокупностью сферических частиц. Каждая  $i$ -я частица характеризуется шестью переменными состояниями:

- координатами положения ( $x_i, y_i, z_i$ );
- компонентами вектора скорости ( $v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}$ ).

Динамика системы частиц описывается вторым законом Ньютона, что позволяет воспроизводить сложные почвенные процессы:

- фрагментацию почвенного массива;
- формирование потоков почвы;
- зоны уплотнения и разрыхления;
- взаимодействие с рабочими органами

$$(1) \quad \left\{ \begin{array}{l} i = 1 \dots N_{\Omega}; \quad \zeta = "x", "y", "z"; \\ m_i \frac{d^2 \zeta_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^{N_{\Omega}} \left( \begin{array}{l} c_{ij} \left( \frac{d_i+d_j}{2} - r_{ij} \right) \frac{(\zeta_i-\zeta_j)}{r_{ij}} + \left( k_{ij}^C \frac{v_{\zeta_i}-v_{\zeta_j}}{|\vec{v}_i-\vec{v}_j|} + k_{ij}^B (v_{\zeta_i} - v_{\zeta_j}) c_{ij} \left( r_{ij} - \alpha_0 \frac{d_i+d_j}{2} \right), r_{ij} < \alpha_0 \frac{d_i+d_j}{2} \right) \\ 0, r_{ij} \geq \alpha_0 \frac{d_i+d_j}{2}; \end{array} \right) + \\ + \sum_{j=1}^{N_{\Pi}} \left( \begin{array}{l} c_{i-\Pi j} \left( \frac{d_i}{2} - r_{i-\Pi j} \right) \frac{(\zeta_i-\zeta_{i-\Pi j})}{r_{i-\Pi j}} + \left( k_{ij}^C \frac{v_{\zeta_i}-v_{\zeta_{i-\Pi j}}}{|\vec{v}_i-\vec{v}_{\Pi j}|} + k_{ij}^B (v_{\zeta_i} - v_{\zeta_{i-\Pi j}}) c_{ij} \left( r_{i-\Pi j} - \alpha_0 \frac{d_i}{2} \right), r_{i-\Pi j} < \alpha_0 \frac{d_i}{2}; \right) \\ 0, r_{i-\Pi j} \geq \alpha_0 \frac{d_i}{2}; \end{array} \right) - m_i g_{\zeta}, \end{array} \right.$$

где  $i$  – номер элемента;  $\zeta$  – обобщенное обозначение декартовой переменной (может принимать значения "x", "y", "z");  $N_{\Omega}$  – количество элементов;  $m_i$  – масса элемента;  $t$  – время;  $j$  – номер элемента, возможно контактирующего с  $i$ -м элементом;  $c_{ij}$  – коэффициент жесткости взаимодействия элементов  $i$  и  $j$  (рассчитывается через объемный модуль упругости почвы)  $k_{ij}^C$  и  $k_{ij}^B$  – коэффициенты сухого трения элементов  $i$  и  $j$  друг о друга;  $d_i$  – диаметр  $i$ -го элемента;  $r_{ij}$  – расстояние между центрами элементов  $i$  и  $j$ ;  $\alpha_0$  – коэффициент ограничения взаимодействия между элементами (находится в диапазоне 1,0...1,1 в зависимости от типа почвы);  $N_{\Pi}$  – количество элементарных поверхностей уплотняющих катков;  $c_{i-\Pi j}$ ,  $k_{i-\Pi j}^C$  и  $k_{i-\Pi j}^B$  – коэффициенты жесткости, сухого и вязкого трения при взаимодействии элемента  $i$  с поверхностью  $j$ ;  $r_{i-\Pi j}$  – расстояние от центра  $i$ -го элемента до  $j$ -й поверхности;  $x_{i-\Pi j}$ ,  $y_{i-\Pi j}$ ,  $z_{i-\Pi j}$  – декартовы координаты точки-проекции центра элемента  $i$  на поверхность  $j$ ;  $v_{\zeta_{i-\Pi j}}$  – компоненты скорости центра  $j$ -й элементарной поверхности;  $|\dots|$  – модуль вектора;  $g_{\zeta}$  – ускорение свободного падения.

Расстояние  $r_{ij}$  между центрами элементов рассчитывается на каждом шаге интегрирования через координаты центров по теореме Пифагора:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}.$$

Решением данной системы дифференциальных уравнений второго порядка являются функции  $x_i(t)$ ,  $y_i(t)$ ,  $z_i(t)$ , определяющие траектории движения элементов почвы и позволяющие оценить качество

заполнения борозды почвой и энергетические затраты.

Элементарные поверхности уплотняющих катков (по 128 элементарных треугольников для каждого катка, построенных на 34 точках) задаются аналитическими уравнениями, с помощью которых определяется расстояние  $r_{i\Pi j}$  между центром элемента  $i$  и элементарной поверхностью  $j$ . Коэффициент жесткости взаимодействия элементов

$c_{ij}$  рассчитываются с использованием справочных данных по объемному модулю упругости почвы  $E$ :

$$c_{ij} = E \cdot \frac{\pi d_3}{4} k_3 \quad (2)$$

где  $E$  – объемный модуль упругости почвы;  $d_3$  – диаметр элемента;  $k_3$  – коэффициент заполнения пространства, учитывающий несплошность заполнения пространства (просветы между элементами) при случайной плотной упаковке элементов почвы.

Уплотняющие катки задаются в модели следующим образом. Положение центра системы из двух катков  $x, y, z$  меняется с течением времени  $t$  следующим образом.

$$\begin{aligned} x(t) &= x_0 + vt; \\ y(t) &= y_0; \\ z(t) &= \begin{cases} z_0 + (z_p - z_0) \frac{t}{t_n}, & t < t_n; \\ z_p, & t \geq t_n, \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

где  $x_0, y_0, z_0$  – положение центра системы из двух катков в начальный момент времени ( $t = 0$ );  $v$  – скорость продольного движения сажалки;  $z_p$  – вертикальная координата системы из двух катков в рабочем положении;  $t_n$  – длительность процесса заглубления уплотняющих катков (в основных компьютерных экспериментах  $t_n = 0,25$  с).

Для оценки эффективности уплотняющих катков и изучения влияния различных конструктивных и технологических параметров с помощью модели рассчитываются три численных показателя, определяющих качество заполнения борозды почвой и энергетические затраты. Для определения показателей качества в процессе компьютерного эксперимента рассчитываются две функции:

-  $S(y, z)$  – функция поперечного профиля борозды, принимающая значение 1 или 0, в зависимости от того, содержит ли поперечное сечение почву при данных координатах  $(y, z)$ .

-  $\rho(y, z)$  – функция распределения плотности почвы в поперечном сечении борозды.

Для получения функций  $S(y, z)$  и  $\rho(y, z)$  производится усреднение вдоль направления движения  $x$  на протяжении 1 м, от положения  $x_1$  за уплотняющими катками, соответствующего началу установившегося режима обработки до положения

$x_2$ , соответствующего моменту времени окончания компьютерного эксперимента. Функции  $S(y, z)$  и  $\rho(y, z)$  изображаются ниже в виде оттенков красного цвета. С точки зрения численной и алгоритмической реализации функции представляют собой переменные массивы размером 120x40, поэтому на картограммах заметна пикселизация.

По функции  $S(y, z)$  определяется средняя высота  $h$  бугорка над бороздой следующим образом.

$$h = \frac{b}{y_2 - y_1} \sum_{i=[y_1/b]}^{[y_2/b]} \max_{j=1..40} \left( z_j, \begin{cases} S(ib, j) = 1; \\ S(ib, j + 1) = 0; \end{cases} \right) - h_0, \quad (4)$$

где  $b$  – шаг дискретизации пространства;  $y_1$  и  $y_2$  – координаты, между которыми расположена борозда; [...] – операция округления до целого числа;  $z_j$  – реальная высота, соответствующая высоте  $j$  после дискретизации пространства;  $h_0$  – высота расположения поверхности почвы.

Средняя плотность почвы в борозде  $\rho$  определяется следующим образом:

$$\rho = \frac{b^2}{(y_2 - y_1)(z_2 - z_1)} \sum_{i=[y_1/b]}^{[y_2/b]} \sum_{j=[z_1/b]}^{[z_2/b]} \rho(ib, jb), \quad (5)$$

где  $z_1$  и  $z_2$  – вертикальные координаты, соответствующие дну и верхней части борозды.

По результатам моделирования определяется средняя сила сопротивления движению уплотняющих катков  $F_x$ :

$$F_x = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \sum_{\tau=[t_1/\Delta t]}^{[t_2/\Delta t]} \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_n} (F_{i-P_j}^\tau)_x, \quad (6)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – моменты времени, в которые производится усреднение силы сопротивления;  $\Delta t$  и  $\tau$  – величина и порядковый номер шага интегрирования уравнений движения по времени;  $N_s$  и  $N_n$  – количество элементов и элементарных треугольных поверхностей;  $(F_{i-P_j}^\tau)_x$  – продольная декартова компонента силы взаимодействия между элементом  $i$  и поверхностью  $P_j$  на шаге интегрирования  $\tau$ .

Методика вычислительного эксперимента

Для реализации дискретно-элементной модели разработан специализированный программный

комплекс "Моделирование процесса заполнения борозды уплотняющими катками" в среде Delphi 7 с использованием языка Object Pascal. Программа реализует численное интегрирование системы дифференциальных уравнений движения частиц с переменным шагом по времени.

Калибровка и верификация модели  
Параметризация модели выполнена методом итеративной калибровки с использованием данных [23.24]. Установлены следующие параметры взаимодействия частиц:

- коэффициент жесткости нормального контакта:  $8 \times 10^6$  Н/м
- коэффициент демпфирования: 0.15
- коэффициент трения: 0.45

Верификация проведена путем сравнительного анализа с экспериментальными данными. Расхождение по силовым характеристикам не превышает 12%, по геометрическим параметрам - 8%.

План параметрических исследований  
Выполнена серия из 19 вычислительных экспериментов с варьированием параметров:

- Влияние просвета между катками ( $\Delta y = 0.07, 0.09, 0.11, 0.13, 0.15, 0.17$  м)
- Влияние угла наклона катка ( $\alpha = 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35^\circ$ )
- Влияние продольного смещения ( $\Delta x = -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2$  м)

Методика обработки результатов  
Пространственные распределения плотности  $\rho(y,z)$  и площади поперечного сечения  $S(y,z)$  получены методом усреднения вдоль оси X на участке 1 м (1000 дискретных точек) по формулам (1) и (2). Функции представлены в виде матриц  $120 \times 40$  с разрешением:

- по оси Y: 2.5 мм/элемент
- по оси Z: 2.0 мм/элемент

Расчет выходных параметров  
Для каждого эксперимента рассчитывались:

- средняя плотность уплотнения по формуле (3)
- высота почвенного валика по формуле (4)
- сила сопротивления по формуле (5)

Визуализация и анализ  
Программный комплекс обеспечивает:

- трёхпроеекционное отображение системы
- построение цветowych картограмм распределения параметров
- расчет интегральных показателей эффективности
- экспорт данных для статистической обработки

Погрешность дискретизации составляет  $\pm 3\%$  для силовых характеристик и  $\pm 5\%$  для геометрических параметров.

Разработанный программный комплекс обладает гибкой системой параметризации, обеспечивающей настройку как конструктивных характеристик уплотняющих катков, так и физико-механических свойств моделируемой почвенной среды через интуитивный пользовательский интерфейс.

Программное обеспечение реализует комплексную визуализацию процесса моделирования в реальном времени. В ходе вычислений осуществляется динамическое отображение системы "катки-почва" в трех проекциях с возможностью интерактивного изменения ракурса наблюдения. Для анализа пространственного распределения плотности почвы генерируются картограммы поперечного сечения борозды, построенные на основе двух независимых вычислительных алгоритмов. Параллельно с графическим выводом выполняется расчет и цифровая индикация комплекса показателей эффективности процесса. Совместное представление результатов в графической и числовой форме обеспечивает возможность оперативного анализа влияния варьируемых параметров на технологический процесс и позволяет проводить визуальную оценку адекватности математической модели (рисунок 1).

Разработанный программный комплекс предъявляет следующие минимальные системные требования: процессор с тактовой частотой 2,56 ГГц и объем оперативной памяти не менее 4 ГБ. Общий объем исходного кода составляет 42 КБ, что свидетельствует о компактности реализации при сохранении полной функциональности.

В результате исследований создана специализированная компьютерная программа "Моделирование заполнения борозды уплотняющими катками", представляющая собой

эффективный инструмент для параметрического анализа рабочего процесса. Программный комплекс позволяет устанавливать количественные зависимости между конструктивно-технологическими параметрами уплотняющих катков и выходными характеристиками процесса, включая показатели качества заполнения борозды и энергетические затраты. Проведенная верификация

подтвердила адекватность математической модели и достоверность получаемых результатов, что делает программный комплекс перспективным для решения задач оптимизации параметров лесопосадочной техники.

Методология анализа данных

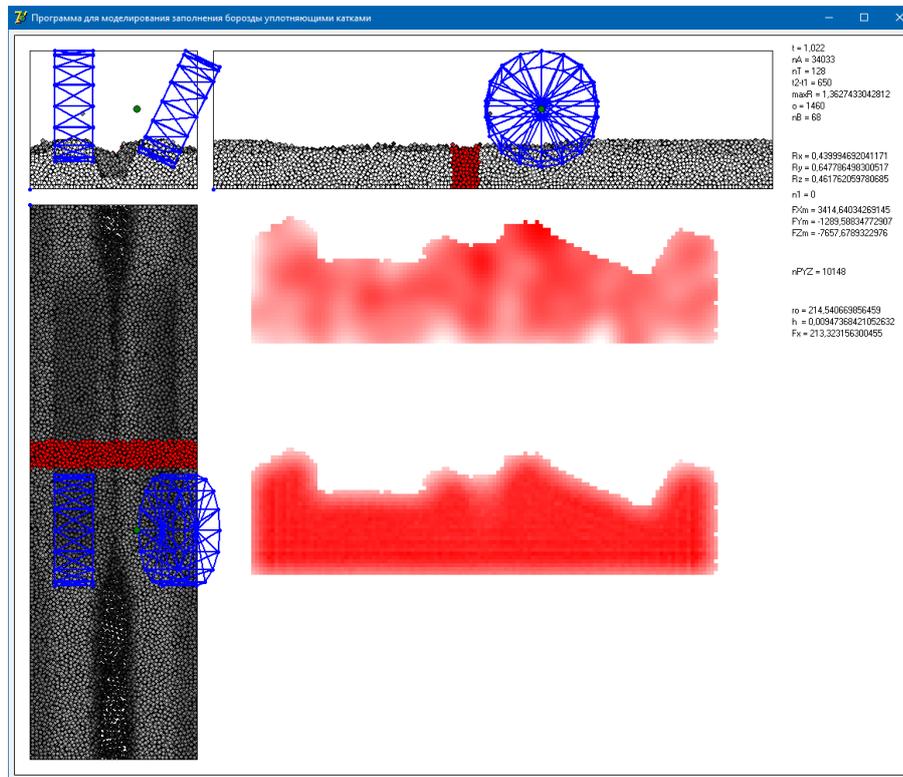


Рисунок 1. Вывод результатов компьютерного эксперимента в разработанной программе

Figure 1. Output of the results of the computer experiment in the developed program

Источник: Собственные вычисления

авторов/Source: Authors' own calculations

Для обработки результатов компьютерного моделирования применен комплекс статистических методов. Обработка данных включала использование методов описательной статистики для расчета средних значений плотности почвы ( $\rho$ ), высоты почвенного валика ( $h$ ) и силы сопротивления ( $F_x$ ). С целью установления количественных взаимосвязей между параметрами системы проведен корреляционный анализ, позволивший выявить степень влияния конструктивных параметров на выходные характеристики технологического процесса.

Для математического описания установленных зависимостей применен регрессионный анализ с построением аппроксимирующих функций  $\rho(\Delta y)$ ,  $h(\alpha)$  и  $F_x(\Delta x)$ . Оценка статистической значимости влияния факторов выполнена методами дисперсионного анализа. Обработка данных осуществлялась с использованием встроенных алгоритмов разработанного программного комплекса.

Визуализация результатов исследования включала построение пространственных распределений плотности почвы в поперечном сечении борозды в форме картограмм, а также графическое представление зависимостей выходных параметров от варьируемых факторов.

Все расчеты выполнены в международной системе единиц СИ. Исходный код программной реализации доступен для научного сообщества по запросу к авторам.

Были проведены три серии параметрических экспериментов:

– влияние просвета между катками ( $\Delta y = 0,07-0,17$  м с шагом 0,02 м)

– влияние угла наклона катка ( $\alpha = 0-35^\circ$  с шагом  $5^\circ$ )

– влияние продольного смещения катка ( $\Delta x = -0,2-0,2$  м с шагом 0,1 м)

### **Результаты**

Проведенное параметрическое исследование методом дискретных элементов позволило установить количественные зависимости между ключевыми конструктивными параметрами уплотняющих катков и показателями эффективности технологического процесса

заполнения борозды. Анализ результатов проводился по трем основным направлениям, соответствующим варьируемым параметрам системы.

### **1. Влияние межосевого расстояния катков ( $\Delta y$ )**

Для исследования влияния данного параметра выполнена серия из шести вычислительных экспериментов с варьированием  $\Delta y$  в диапазоне 0,07-0,17 м с шагом 0,02 м. Визуальный анализ пространственных распределений плотности (рис. 2-4) демонстрирует существенную зависимость качества уплотнения от величины просвета между катками. При значениях  $\Delta y > 0,15$  м наблюдается выраженная неоднородность уплотнения с формированием зоны пониженной плотности в центральной части борозды. Это объясняется недостаточным перекрытием рабочих зон катков и снижением эффективности взаимодействия с почвенной массой.

Количественный анализ графических зависимостей (рис. 5) подтверждает наличие выраженного оптимума в диапазоне  $\Delta y = 0,09-0,11$  м. В этой области достигаются максимальные значения плотности почвы (превышающие 1,59 г/см<sup>3</sup>) и высоты почвенного валика (более 14 мм). При этом энергетические показатели процесса остаются на приемлемом уровне - сила сопротивления движению орудия не превышает 705 Н. Следует отметить, что изменение просвета в исследованном диапазоне позволяет варьировать плотность уплотнения в пределах 12-15%, что свидетельствует о высокой чувствительности процесса к данному параметру.

Таким образом, оптимальная величина просвета между катками составляет 0,09 ... 0,11 м, при этом обеспечивается плотность почвы в борозде более 1,59 г/см<sup>3</sup>, высота бугорка над бороздой более 14 мм, сила сопротивления движению орудия не более 705 Н.

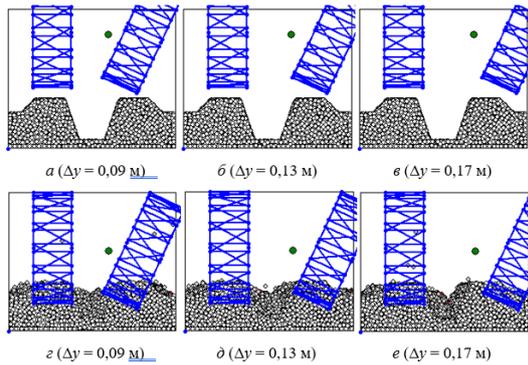


Рисунок 2 Несколько вариантов расстояния между уплотняющими катками, проверяемых в компьютерных экспериментах: а ... в – с поднятой над бороздой сажалкой; г ... е – в рабочем положении

Figure 2 Several options for the distance between compacting rollers tested in computer experiments: а ... в – with the planter raised above the furrow; г ... е – in the working position

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

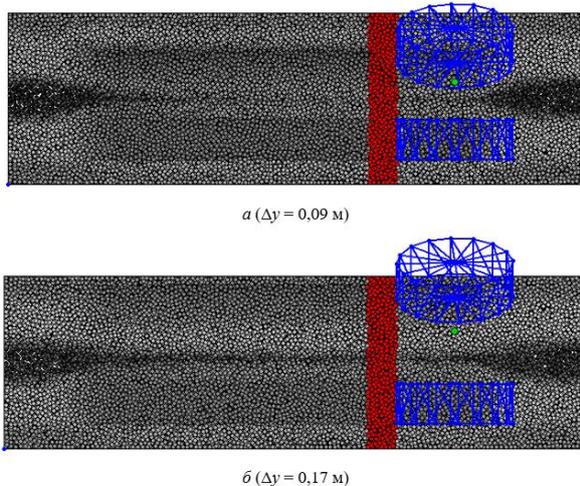


Рисунок 3 Характер заполнения борозды в зависимости от расстояния  $\Delta y$  между уплотняющими катками

Figure 3. Furrow filling pattern depending on the distance  $\Delta y$  between the compacting rollers

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

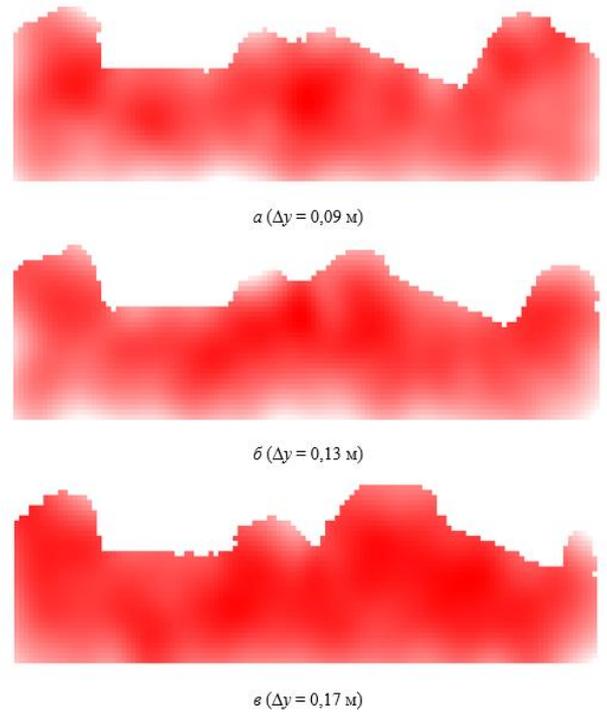


Рисунок 4 Профиль борозды и картограмма распределения плотности почвы  $\rho(y, z)$  в зависимости от расстояния  $\Delta y$  между уплотняющими катками

Figure 4 Furrow profile and cartogram of soil density distribution  $\rho(y, z)$  depending on the distance  $\Delta y$  between compacting rollers

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

## 2. Влияние угла наклона уплотняющего катка

В зависимости от угла наклона катка  $\alpha$  изменяются вертикальная и горизонтальная составляющие силы, действующей на поток почвы, заполняющей борозду (рисунок 6). Для изучения влияния угла  $\alpha$  проведена серия из восьми компьютерных экспериментов, в которых изменяли  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $35^\circ$  с шагом  $5^\circ$ .

## 2. Оптимизация угла наклона рабочей поверхности ( $\alpha$ )

Для исследования влияния угла наклона рабочей поверхности проведена серия из восьми вычислительных экспериментов с варьированием

параметра  $\alpha$  от 0 до 35° с шагом 5°. Конфигурации рабочих органов для различных углов наклона представлены на рисунке 6, где показаны как статические положения катков при поднятой сажалке (а-в), так и их рабочие положения в процессе уплотнения (г-е).

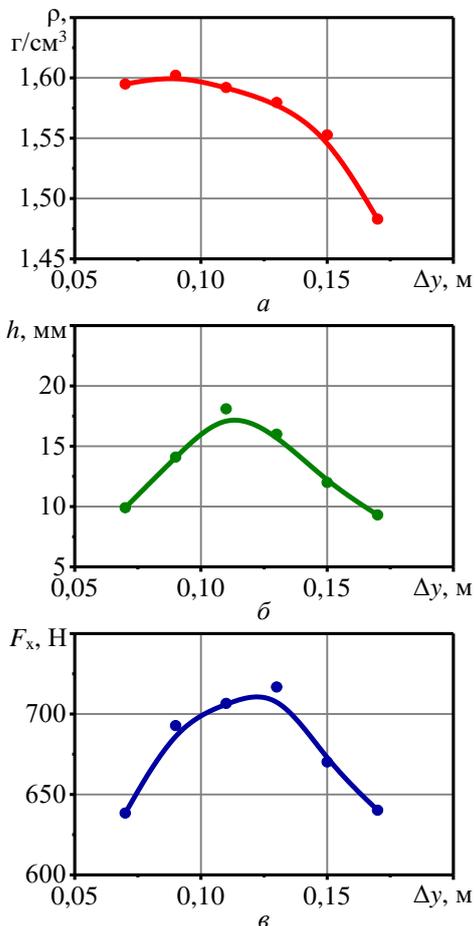


Рисунок 5 Влияние просвета  $\Delta y$  между уплотняющими катками на среднюю плотность почвы в борозде (а), среднюю высоту бугорка над бороздой  $h$  (б) и среднюю силу сопротивления движения  $F_x$  (в)

Figure 5. The influence of the clearance  $\Delta y$  between the compacting rollers on the average soil density in the furrow (a), the average height of the hummock above the furrow  $h$  (b) and the average resistance force of movement  $F_x$  (c)

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

Анализ визуализированных результатов заполнения борозды (рисунок 7) демонстрирует

существенное влияние угла наклона на кинематику почвенного потока. При изменении угла  $\alpha$  происходит перераспределение вертикальной и горизонтальной составляющих силы, действующей на уплотняемую почвенную массу, что непосредственно влияет на формирование профиля борозды и плотность ее заполнения.

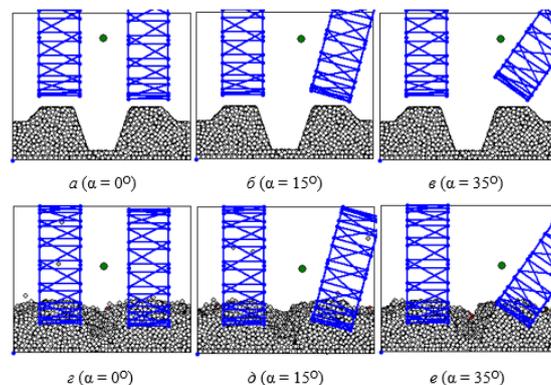


Рисунок 6 Несколько вариантов угла наклона  $\alpha$  одного из уплотняющих катков, проверяемых в компьютерных экспериментах: а ... в – с поднятой над бороздой сажалкой; г ... е – в рабочем положении

Figure 6 Several variants of the inclination angle  $\alpha$  of one of the compacting rollers tested in computer experiments: а ... с – with the planter raised above the furrow; г ... е – in the working position

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

Более детальный анализ поперечных сечений (рисунок 8) позволяет выявить характерные особенности процесса уплотнения при различных углах наклона. При минимальных значениях угла ( $\alpha = 0-10^\circ$ ) наблюдается преимущественно вертикальное воздействие на почвенный массив, что приводит к образованию широкой зоны уплотнения с относительно равномерным распределением плотности. Однако, как показывают количественные данные (рисунок 9а), эффективность уплотнения в этом режиме оказывается недостаточно высокой - значения плотности не превышают 1,56-1,57 г/см<sup>3</sup>.

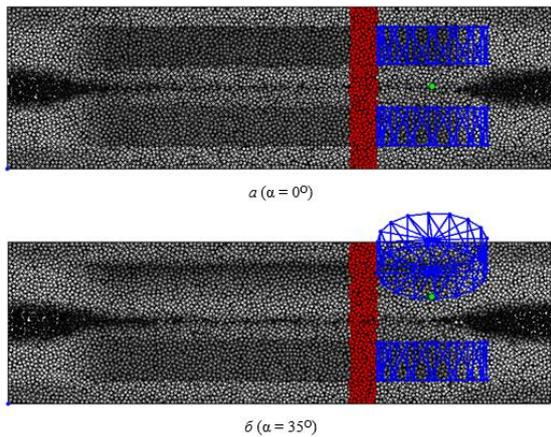


Рисунок 7 – Характер заполнения борозды в зависимости от угла наклона  $\alpha$  уплотняющего катка  
 Figure 7 – Furrow filling pattern depending on the inclination angle  $\alpha$  of the compacting roller

Источник: Собственные вычисления авторов  
 Source: Authors' own calculations

При увеличении угла наклона до 15-20° (рисунок 8б) отмечается оптимальное соотношение вертикальной и горизонтальной составляющих уплотняющего усилия. Картограммы распределения плотности демонстрируют формирование компактной зоны интенсивного уплотнения в центральной части борозды с значениями плотности до 1,59 г/см<sup>3</sup>.

Одновременно наблюдается увеличение высоты почвенного валика до 20-21 мм (рисунок 9б), что свидетельствует об эффективном заполнении борозды и создании благоприятных условий для последующего развития корневой системы саженцев.

Дальнейшее увеличение угла наклона свыше 25° приводит к постепенному ухудшению показателей уплотнения.

При  $\alpha = 35^\circ$  (рисунок 8в) визуально отмечается снижение однородности распределения плотности, а количественные измерения фиксируют уменьшение средней плотности до 1,54 г/см<sup>3</sup>. Это объясняется преобладанием горизонтальной составляющей усилия, вызывающей сдвиговые деформации почвенного массива без обеспечения необходимого объемного уплотнения.

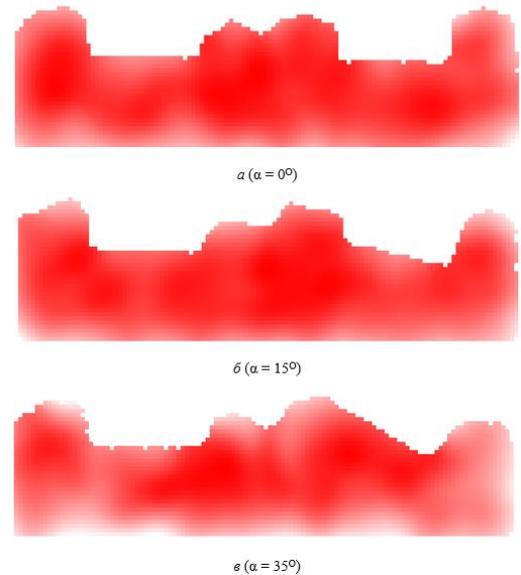


Рисунок 8 Профиль борозды и картограмма распределения плотности почвы  $\rho(y, z)$  в зависимости от угла  $\alpha$  наклона наклонного катка  
 Figure 8 Furrow profile and cartogram of soil density distribution  $\rho(y, z)$  depending on the angle  $\alpha$  of the inclined roller

Источник: Собственные вычисления авторов  
 Source: Authors' own calculations

Энергетические показатели процесса (рисунок 9в) демонстрируют немонотонную зависимость от угла наклона. Минимальные значения силы сопротивления (около 760 Н) наблюдаются в оптимальном диапазоне углов 15-20°, тогда как при крайних значениях угла (0° и 35°) сила сопротивления возрастает до 820-850 Н, что свидетельствует о неэффективном использовании энергии в этих режимах.

Таким образом, комплексный анализ результатов позволяет установить оптимальный диапазон углов наклона уплотняющего катка  $\alpha = 15-20^\circ$ , обеспечивающий достижение максимальных показателей качества уплотнения при минимальных энергозатратах.

3. Влияние продольного смещения уплотняющего катка ( $\Delta x$ )

Для оценки влияния продольного смещения наклонного катка относительно опорного была проведена серия экспериментов с изменением  $\Delta x$  в диапазоне от -0.2 до 0.2 м. Рисунок 10 наглядно

демонстрирует, что характер заполнения борозды почвой критически зависит от данного параметра.

Смещение одного катка вперед или назад относительно другого нарушает синхронность воздействия на почвенный поток, что визуально выражается в асимметричном формировании борозды и бугорка.

Более глубокий анализ позволяет провести Рисунок 11, на котором представлены профили борозды и картограммы распределения плотности почвы  $\rho(y,z)$ . Данные картограммы четко показывают, что при нулевом смещении ( $\Delta x = 0$  м) зона максимального уплотнения является наиболее симметричной и равномерно распределенной по дну и стенкам борозды.

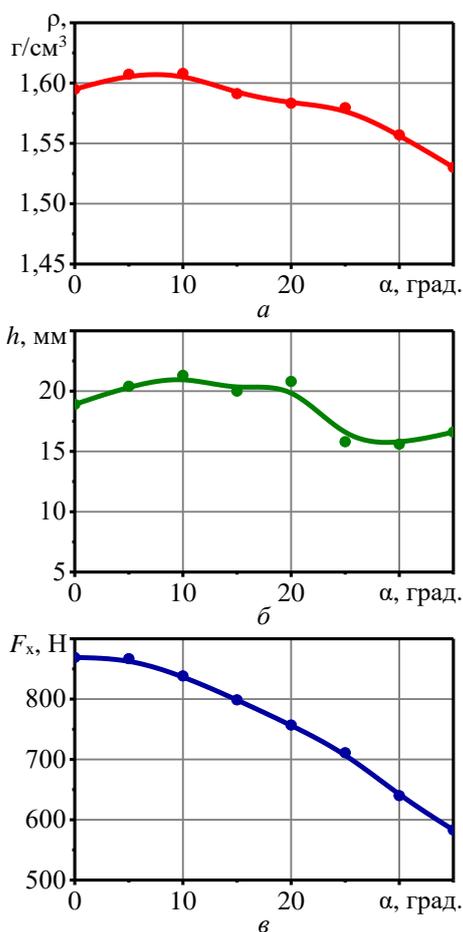


Рисунок 9 – Влияние угла наклона уплотняющего катка  $\alpha$  на среднюю плотность почвы в борозде (а), среднюю высоту бугорка над бороздой  $h$  (б) и среднюю силу сопротивления движения  $F_x$  (в)

Figure 9 – Effect of the compaction roller inclination angle  $\alpha$  on the average soil density in the furrow (a), the average height of the hummock above the furrow  $h$  (b) and the average resistance force of movement  $F_x$  (c)

Источник: Собственные вычисления авторов  
Source: Authors' own calculations

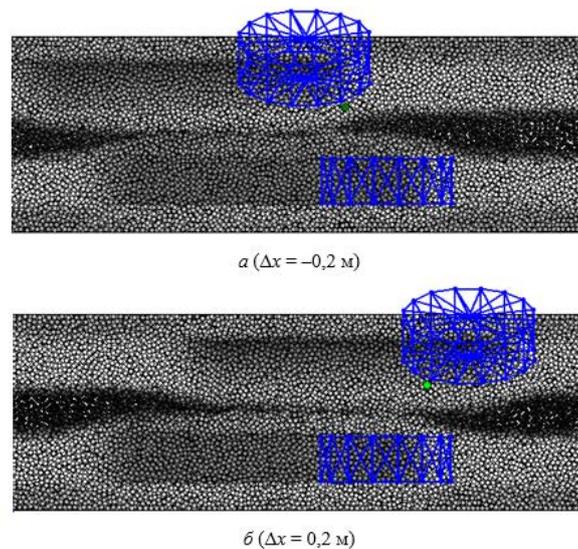


Рисунок 10 Характер заполнения борозды в зависимости от смещения  $\Delta x$  наклонного катка относительно опорного в продольном направлении  
Figure 10. Furrow filling pattern depending on the displacement  $\Delta x$  of the inclined roller relative to the support roller in the longitudinal direction

Источник: Собственные вычисления авторов  
Source: Authors' own calculations

Любое отклонение от этого положения – как отрицательное (смещение назад, -0.1 м, -0.2 м), так и положительное (смещение вперед, +0.1 м, +0.2 м) – приводит к существенной деградации картины уплотнения. Плотность перераспределяется неравномерно, формируя локализованные зоны с повышенным и пониженным уплотнением, что свидетельствует о нарушении оптимального процесса деформации почвенной массы.

Количественную оценку этого влияния предоставляет Рисунок 12. Зависимости средней плотности почвы в борозде (а) и средней высоты бугорка (б) от смещения  $\Delta x$  имеют ярко выраженный экстремальный характер с четким максимумом в точке  $\Delta x = 0$  м. Это однозначно

указывает на то, что соосное расположение катков в продольной плоскости является необходимым условием для достижения максимального качества заделки борозды.

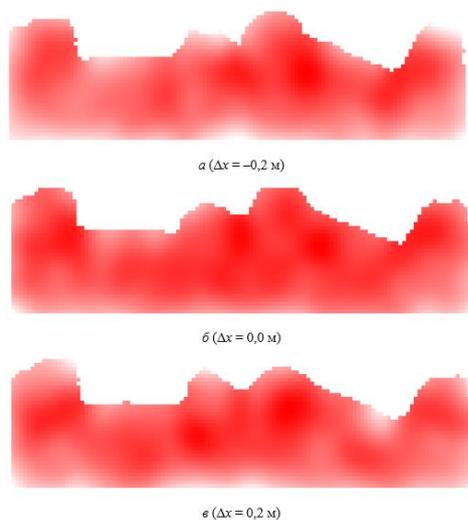


Рисунок 11 Профиль борозды и картограмма распределения плотности почвы  $\rho(y, z)$  в зависимости от смещения  $\Delta x$  наклонного относительно опорного

Figure 11 Furrow profile and cartogram of soil density distribution  $\rho(y, z)$  depending on the displacement  $\Delta x$  of the inclined roller relative to the support roller

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

При этом сила сопротивления движению орудия  $F_x$  (в), будучи минимальной при  $\Delta x = 0$  м, монотонно возрастает при любом смещении катков, что дополнительно подтверждает энергетическую невыгодность такой конфигурации. Таким образом, продольное смещение наклонного катка не может быть использовано для компромиссной оптимизации и должно быть исключено, а его оптимальное значение строго равно нулю.

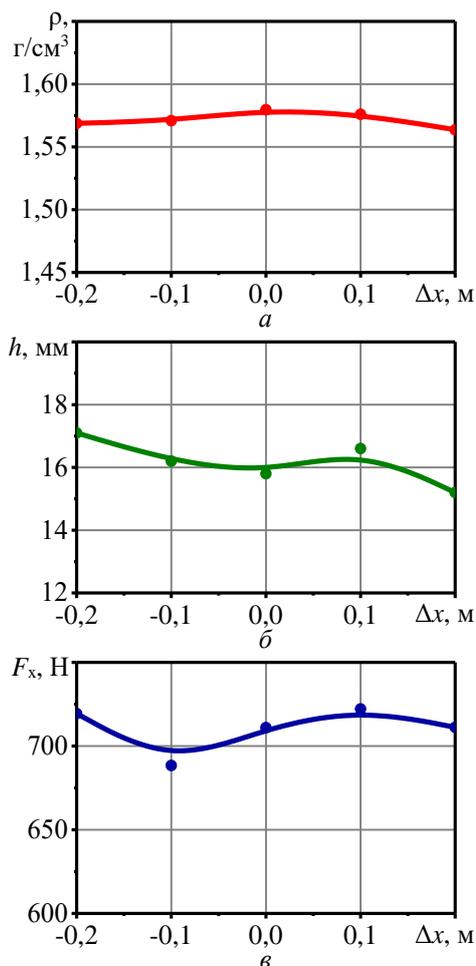


Рисунок 12 Влияние смещения  $\Delta x$  наклонного катка относительно опорного на среднюю плотность почвы в борозде (а), среднюю высоту бугорка над бороздой  $h$  (б) и среднюю силу сопротивления движения  $F_x$  (в)

Figure 12. The effect of the displacement  $\Delta x$  of the inclined roller relative to the support roller on the average soil density in the furrow (a), the average height of the tubercle above the furrow  $h$  (b) and the average force of resistance to movement  $F_x$  (c)

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

**Заключение**

Проведенное исследование позволило разработать научные основы параметрического проектирования системы уплотняющих катков лесных сажалок на основе методов компьютерного моделирования. В отличие от традиционных эмпирических подходов, предложенная методика обеспечивает комплексный учет взаимосвязанного

влияния конструктивных параметров на конфликтующие выходные характеристики технологического процесса.

Созданный специализированный программный комплекс, реализующий дискретно-элементную модель взаимодействия уплотняющих катков с почвенной средой, продемонстрировал физическую адекватность и точность, достаточную для инженерных расчетов. Верификация модели показала расхождение с экспериментальными данными не более 12% по силовым характеристикам и 8% по геометрическим параметрам, что подтверждает достоверность получаемых результатов.

Установлено, что параметры системы обладают выраженной неравнозначностью влияния на процесс заделки борозды. Просвет между катками  $\Delta y$  идентифицирован как ключевой параметр, определяющий формирование зоны уплотнения. Научно обоснован оптимальный диапазон его значений 0,09-0,11 м, обеспечивающий плотность почвы более 1,59 г/см<sup>3</sup> при сохранении энергозатрат на приемлемом уровне. Превышение данного диапазона приводит к существенной деградации качества уплотнения вследствие формирования зоны пониженной плотности в центральной части борозды.

Угол наклона рабочей поверхности катка  $\alpha$  оказывает существенное влияние на распределение уплотняющих усилий. Экстремальный характер

зависимостей выходных параметров от угла наклона позволил определить оптимальный диапазон 15-20°, характеризующийся балансом вертикальной и горизонтальной составляющих силового воздействия. В этой области достигаются максимальные значения плотности уплотнения (1,58-1,59 г/см<sup>3</sup>) и высоты почвенного валика (20-21 мм) при минимальных энергозатратах.

Установлена принципиальная нецелесообразность продольного смещения катков относительно друг друга. Нулевое значение параметра  $\Delta x$  обеспечивает симметричное распределение плотности, максимальное качество заделки борозды и минимальное сопротивление движению. Любое отклонение от соосного расположения катков приводит к асимметрии уплотнения и росту энергопотребления.

Полученные результаты имеют практическую значимость для проектирования лесопосадочной техники. Предложенные оптимальные параметры системы уплотняющих катков ( $\Delta y = 0,09-0,11$  м,  $\alpha = 15-20^\circ$ ,  $\Delta x = 0$  м) обеспечивают воспроизводимое качество заделки борозды при рациональных энергозатратах. Разработанная методика параметрического анализа обладает потенциалом для адаптации к различным почвенно-климатическим условиям и может служить основой для создания перспективных моделей лесопосадочных машин.

### Список литературы

1. 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 (3): 541. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13030541>.
2. Ye, R., Ma, X., Zhao, J., Liao, J., Liu, X., Xi, L., & Su, G. Optimization and Design of Disc-Type Furrow Opener of No-Till Seeder for Green Manure Crops in South Xinjiang Orchards. *Agriculture*. 2023; 13 (8): 1474. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13081474>.
3. Li, J., Tang, H., & Wang, X. Calibration of discrete element parameters for soil in different compaction states. *Advanced Powder Technology*. 2023; 34 (1): 103878. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2023.103878>.
4. Walunj, A., Chen, Y., Tian, Y., & Zeng, Z. Modeling Soil-Plant-Machine Dynamics Using Discrete Element Method: A Review. *Agronomy*. 2023; 13 (5): 1260. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13051260>.
5. Yeşilkaya, M., Daş, G.S., & Türker, A.K. A multi-objective multi-period mathematical model for an industrial symbiosis network based on the forest products industry. *Computers & Industrial Engineering*. 2020; 150: 106883. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106883>.

6. Fu, W., Tian, Z., Amoozegar, A., & Heitman, J. Measuring dynamic changes of soil porosity during compaction. *Soil and Tillage Research*. 2019; 193: 114–121. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.016>.
7. 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 (5): 1011. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14051011>.
8. López-Bravo, E., Tijsskens, E., González-Cueto, O., Herrera-Suárez, M., Lorenzo-Rojas, J.D., & Ramon, H. Simulation of clay soil de-compaction using discrete element method. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 2019; 28 (2).
9. Hu, M., Gao, T., Dong, X.W., Tan, Q.T., Yi, C., Wu, F., & Bao, A.H. Simulation of soil-tool interaction using smoothed particle hydrodynamics (SPH). *Soil and Tillage Research*. 2023; 229: 105671. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105671>.
10. Bradley, A.C., Jaksa, M.B., & Kuo, Y.L. Ground response of rolling dynamic compaction - a finite element modeling approach. *Frontiers in Built Environment*. 2024; 9: 1334090. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1334090>.
11. Kim, I., Seo, J., Woo, H., & Choi, B. Assessing Rutting and Soil Compaction Caused by Road Extraction Using Traditional and Remote Sensing Methods. *Forests*. 2025; 16 (1): 86. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f16010086>.
12. Ghaffariyan, M. A short review on studies on work productivity of mechanical tree planting. *Silva Balcanica*. 2021; 22 (2): 25–32. – DOI: <https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.22.e70035>.
13. Раднаев Д.Н., Сергеев Ю.А., Абидуев А.А., Калашников С.С. Влияние конструкции шпоры катка для сплошного прикатывания на рыхление и уплотнение почвы. *Дальневосточный аграрный вестник*. – 2022. – Т. 16, № 4. – С. 114–121. – DOI: [https://doi.org/10.22450/199996837\\_2022\\_4\\_114](https://doi.org/10.22450/199996837_2022_4_114).
14. Лысыч М.Н., Малюков С.В., Шавков М.В., Гнусов М.А. Исследование полуавтоматического посадочного механизма для семян с закрытой корневой системой в среде САПР с полноразмерным макетированием средствами 3D-печати. *Лесной вестник. Forestry Bulletin*. – 2025. – Т. 29, № 1. – С. 144–161. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2025-1-144-161>.
15. Черник К.Н., Елисеев С.Г. Обоснование рабочей скорости лесопосадочной машины для семян с закрытой корневой системой. *Хвойные бореальной зоны*. – 2025. – Т. 43, № 1. – С. 85–91. – DOI: <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2025-1-85-91>.
16. Song, W., Ren, L., Wang, J., Ma, Y., Guo, Y., Han, M., & Zhao, H. Methods for constructing soil dynamic models under intelligent cultivation: dynamic interaction mechanisms between farming tools with complex structures and soil. *Agriculture*. 2025; 15 (13): 1355. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture15131355>.
17. Charuk, A., Gawdzińska, K., & Dunaj, P. Finite element modeling of the dynamic response of plywood. *Materials*. 2024; 17 (17): 4358. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17174358>.
18. Reza, M.N., Islam, M.N., Chowdhury, M., Ali, M., Islam, S., Kiraga, S., Lim, S.J., Choi, I.S., & Chung, S.O. Kinematic analysis of a gear-driven rotary planting mechanism for a six-row self-propelled onion transplanter. *Machines*. 2021; 9 (9): 183. – DOI: <https://doi.org/10.3390/machines9090183>.
19. Малюков С.В., Бухтояров Л.Д., Лысыч М.Н., Шавков М.В. Оптимизация параметров комбинированного орудия для сплошной обработки почвы - плоскорез и дисковый плуг. *Системы. Методы. Технологии*. – 2025. – № 3 (67). – С. 109–115. – DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2025-3-109-115>.
20. Патент РФ на полезную модель № 232999 U1. Лесопосадочная машина / Малюков С.В., Войнаш С.А., Арико С.Э. и др.; патентообладатель Алтайский государственный университет. – 2025.
21. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025622310 РФ. Результаты лабораторного эксперимента по определению сил сопротивления движению рабочих органов комбинированного почвообрабатывающего орудия / Малюков С.В., Петков А.Ф., Лысыч М.Н., Аксенов А.А.; правообладатель Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова. – 2025.

22. Трегубов О.В., Лактионов А.П., Мизин Ю.А., Комарова О.В., Пилипенко В.Н., Похваленко В.А. Опыт создания лесных культур с закрытой корневой системой в степной и лесостепной зонах юга Российской Федерации. Астраханский вестник экологического образования. – 2022. – № 5 (70). – С. 203–211.
23. Li, S., Diao, P., Zhao, Y., Miao, H., Li, X., & Zhao, H. Calibration of discrete element parameter of soil in high-speed tillage. *INMATEH-Agricultural Engineering*. 2023; 71: 231–242. – DOI: <https://doi.org/10.35633/inmateh-71-21>.
24. Gainullin, I.A. Modelling the interaction of thrusters with the soil using the discrete element method in rocky dem. *International Research Journal*. 2023; 5 (131). – DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.131.29>.

### References

1. 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(3):541. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13030541>.
2. Ye, R., Ma, X., Zhao, J., Liao, J., Liu, X., Xi, L., & Su, G. Optimization and Design of Disc-Type Furrow Opener of No-Till Seeder for Green Manure Crops in South Xinjiang Orchards. *Agriculture*. 2023;13(8):1474. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13081474>.
3. Li, J., Tang, H., & Wang, X. Calibration of discrete element parameters for soil in different compaction states. *Advanced Powder Technology*. 2023;34(1):103878. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2023.103878>.
4. Walunj, A., Chen, Y., Tian, Y., & Zeng, Z. Modeling Soil–Plant–Machine Dynamics Using Discrete Element Method: A Review. *Agronomy*. 2023;13(5):1260. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13051260>.
5. Yeşilkaya, M., Daş, G. S., & Türker, A. K. A multi-objective multi-period mathematical model for an industrial symbiosis network based on the forest products industry. *Computers & Industrial Engineering*. 2020;150:106883. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106883>.
6. Fu, W., Tian, Z., Amoozegar, A., & Heitman, J. Measuring dynamic changes of soil porosity during compaction. *Soil and Tillage Research*. 2019;193:114–121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.016>.
7. 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(5):1011. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14051011>.
8. López-Bravo, E., Tijksens, E., González-Cueto, O., Herrera-Suárez, M., Lorenzo-Rojas, J. D., & Ramon, H. Simulation of clay soil de-compaction using discrete element method. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 2019;28(2).
9. Hu, M., Gao, T., Dong, X. W., Tan, Q. T., Yi, C., Wu, F., & Bao, A. H. Simulation of soil-tool interaction using smoothed particle hydrodynamics (SPH). *Soil and Tillage Research*. 2023;229:105671. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105671>.
10. Bradley, A. C., Jaksa, M. B., & Kuo, Y. L. Ground response of rolling dynamic compaction - a finite element modeling approach. *Frontiers in Built Environment*. 2024;9:1334090. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1334090>.
11. Kim, I., Seo, J., Woo, H., & Choi, B. Assessing Rutting and Soil Compaction Caused by Road Extraction Using Traditional and Remote Sensing Methods. *Forests*. 2025;16(1):86. DOI: <https://doi.org/10.3390/f16010086>.
12. Ghaffariyan, M. A short review on studies on work productivity of mechanical tree planting. *Silva Balcanica*. 2021;22(2):25–32. DOI: <https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.22.e70035>.
13. Radnaev, D. N., Sergeev, Y. A., Abiduev, A. A., & Kalashnikov, S. S. Vliyanie konstruksii shpory katka dlya sploshnogo prikatyvaniya na rykhlenie i uplotnenie pochvy [Influence of the design of the spur roller for continuous packing on soil loosening and compaction]. *Dal'nevostochnyi Agrarnyi Vestnik*. 2022;16(4):114–121. (In Russ.). DOI: [https://doi.org/10.22450/199996837\\_2022\\_4\\_114](https://doi.org/10.22450/199996837_2022_4_114).

14. Lysych, M. N., Malyukov, S. V., Shavkov, M. V., & Gnusov, M. A. Issledovanie poluavtomaticheskogo posadochnogo mekhanizma dlya seyantsev s zakrytoi kornevoi sistemoi v srede SAPR s polnorazmernym maketirovaniem sredstvami 3D-pechati [Research of a semi-automatic planting mechanism for seedlings with a closed root system in a CAD environment with full-size prototyping by means of 3D printing]. *Lesnoi Vestnik. Forestry Bulletin*. 2025;29(1):144–161. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2025-1-144-161>.
15. Chernik, K. N., & Eliseev, S. G. Obosnovanie rabochei skorosti lesoposadochnoi mashiny dlya seyantsev s zakrytoi kornevoi sistemoi [Substantiation of the operating speed of a forest planting machine for seedlings with a closed root system]. *Khvoynye Boreal'noi Zony*. 2025;43(1):85–91. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2025-1-85-91>.
16. Song, W., Ren, L., Wang, J., Ma, Y., Guo, Y., Han, M., & Zhao, H. Methods for constructing soil dynamic models under intelligent cultivation: dynamic interaction mechanisms between farming tools with complex structures and soil. *Agriculture*. 2025;15(13):1355. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture15131355>.
17. Charuk, A., Gawdzińska, K., & Dunaj, P. Finite element modeling of the dynamic response of plywood. *Materials*. 2024;17(17):4358. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17174358>.
18. Reza, M. N., Islam, M. N., Chowdhury, M., Ali, M., Islam, S., Kiraga, S., Lim, S. J., Choi, I. S., & Chung, S. O. Kinematic analysis of a gear-driven rotary planting mechanism for a six-row self-propelled onion transplanter. *Machines*. 2021;9(9):183. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines9090183>.
19. Malyukov, S. V., Bukhtoyarov, L. D., Lysych, M. N., & Shavkov, M. V. Optimizatsiya parametrov kombinirovannogo orudiya dlya sploshnoi obrabotki pochvy - ploskorez i diskovyi plug [Optimization of parameters of a combined tool for continuous soil cultivation - flat cutter and disc plow]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2025;3(67):109–115. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2025-3-109-115>.
20. Patent RF na poleznuyu model' № 232999 U1. Lesoposadochnaya mashina [RF Patent for Utility Model No. 232999 U1. Forest planting machine]. Malyukov S. V., Voinash S. A., Arico S. E. et al.; patent holder Altai State University. 2025.
21. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh № 2025622310 RF. Rezul'taty laboratornogo eksperimenta po opredeleniyu sil soprotivleniya dvizheniyu rabochikh organov kombinirovannogo pochvoobrabatyvayushchego orudiya [Certificate of State Registration of the Database No. 2025622310 RF. Results of a laboratory experiment to determine the resistance forces to the movement of the working bodies of a combined tillage tool]. Malyukov S. V., Petkov A. F., Lysych M. N., Aksenov A. A.; certificate holder Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. 2025.
22. Tregubov, O. V., Laktionov, A. P., Mizin, Y. A., Komarova, O. V., Pilipenko, V. N., & Pokhvalenko, V. A. Opyt sozdaniya lesnykh kul'tur s zakrytoi kornevoi sistemoi v stepnoi i lesostepnoi zonakh yuga Rossiiskoi Federatsii [Experience in creating forest crops with a closed root system in the steppe and forest-steppe zones of the south of the Russian Federation]. *Astrakhanskii Vestnik Ekologicheskogo Obrazovaniya*. 2022;5(70):203–211. (In Russ.).
23. Li, S., Diao, P., Zhao, Y., Miao, H., Li, X., & Zhao, H. Calibration of discrete element parameter of soil in high-speed tillage. *INMATEH-Agricultural Engineering*. 2023;71:231–242. DOI: <https://doi.org/10.35633/inmateh-71-21>.
24. Gainullin, I. A. Modelling the interaction of thrusters with the soil using the discrete element method in rocky dem. *International Research Journal*. 2023;5(131). DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.131.29>.

### Сведения об авторах

*Гнусов Максим Александрович* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности и правовых отношений, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>, e-mail: [mgnusov@ya.ru](mailto:mgnusov@ya.ru)

*Дручинин Денис Юрьевич* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>, e-mail: [druchinin.denis@rambler.ru](mailto:druchinin.denis@rambler.ru)

✉ *Школьных Александр Васильевич* – аспирант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3311-5907>, e-mail: [alex.hk525@gmail.com](mailto:alex.hk525@gmail.com)

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

### Information about authors

*Maxim A. Gnusov* – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Life Safety and Legal Relations, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov”, 8 Timiryazev Street, Voronezh, 394087, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>, e-mail: [mgnusov@ya.ru](mailto:mgnusov@ya.ru)

*Denis Yu. Druchinin* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, 8 Timiryazev St., Voronezh, 394087, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>, e-mail: [druchinin.denis@rambler.ru](mailto:druchinin.denis@rambler.ru)

✉ *Aleksandr V. Shkolnykh* – postgraduate student of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov”, 8 Timiryazeva St., Voronezh, 394087, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3311-5907>, e-mail: [alex.hk525@gmail.com](mailto:alex.hk525@gmail.com)

*Mikhail N. Lysych* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Forestry, Metrology, Standardization and Certification, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov”, Timiryazev St. 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>, e-mail: [miklynea@yandex.ru](mailto:miklynea@yandex.ru)

✉ – For contacts/Corresponding author