

ИССЛЕДОВАНИЕ МАССОИНЕРЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСНЫХ ПЛУГОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ КОМПЬЮТЕРНОГО ИНЖИНИРИНГА

Д.Ю. Дручинин[✉], М.А. Попов, М.Н. Лысыч,
В.Р. Фатхулин, М.А. Гнусов

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»
(ВГЛТУ), Россия, 394087, Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8

druchinin.denis@rambler.ru

Определена необходимость разработки современных образцов техники для обработки лесной почвы, в том числе с повышенной степенью увлажнения. Представлены разработанные конструкции лесных плугов для отваливания пластов и для создания линейных гряд. Проведено исследование их массоинерционных характеристик на основе спроектированных 3D-моделей. Выполнена оценка распределения массы по узлам исследуемых конструкций с использованием САПР. Построены эпюры поверхностей распределения массы по элементам конструкции орудий. Найдено расположение центра масс разработанных плугов с учетом их габаритных размеров. Осуществлена проработка схемы агрегатирования скомпонованных орудий с базовыми тракторами класса тяги 3 и 1,4 тс. Проведено теоретическое исследование рабочего процесса плугов, основанное на математическом моделировании, для определения необходимых энергетических характеристик машинно-тракторного агрегата для разрабатываемых орудий, где в качестве классификационного параметра использована величина номинального тягового усилия тракторов. Выполнена оценка соотношения необходимой силы тяги к номинальной тяговой силе трактора путем расчета специального коэффициента. Проведено исследование по нахождению оптимального значения силы тяги трактора в составе машинно-тракторного агрегата с учетом параметров обрабатываемой почвы и проектируемых орудий. Рекомендуется для агрегатирования с лесными плугами, обрабатывающими переувлажненную почву с повышенным тяговым сопротивлением путем создания линейных гребней или отваливания пластов по краям борозды, использовать трактор класса тяги 3 тс и выше или трактор класса тяги 1,4 тс.

Ключевые слова: лесной плуг, микроповышение, 3D-модель, массоинерционные характеристики, тяговое средство, сила тяги трактора

Ссылка для цитирования: Дручинин Д.Ю., Попов М.А., Лысыч М.Н., Фатхулин В.Р., Гнусов М.А. Исследование массоинерционных характеристик лесных плугов с использованием средств компьютерного инжиниринга // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 4. С. 122–135.
DOI: 10.17816/2542-1468-2026-4-122-135

Актуальные на 2025 г. данные свидетельствуют о сохранении Россией статуса ведущей лесной державы: согласно докладу Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО) «Глобальная оценка лесных ресурсов 2025 года» на долю РФ приходится 20 % мировых лесов. Для восполнения и увеличения объемов лесного фонда РФ необходимо проведение работ по своевременному восстановлению утрачиваемых насаждений [1–3].

Современные методы производственной деятельности в лесном хозяйстве позволяют достичь высоких показателей лесовосстановления после заготовок деловой древесины и лесных

пожаров. Современные лесозаготовительные комплексы обеспечивают эффективность разработки лесосек в различных природно-климатических условиях, что ввиду наблюдаемого истощения лесосырьевых ресурсов приобрело широкую актуальность [4–6]. В работах [7, 8] отмечается факт выполнения лесосечных работ в пределах бореальных лесов, восстановление которых представляет собой первостепенную задачу лесного хозяйства, поскольку именно эти леса северной таежной зоны способствуют активной абсорбции углерода из атмосферы. Заготовка древесины часто осуществляется на временно переувлажненных площадях, характеризующихся возникновением избытка влаги в результате таяния снега или выпадения обильных дождей, что приводит к ее накоплению, а в некоторых случаях обуславливает

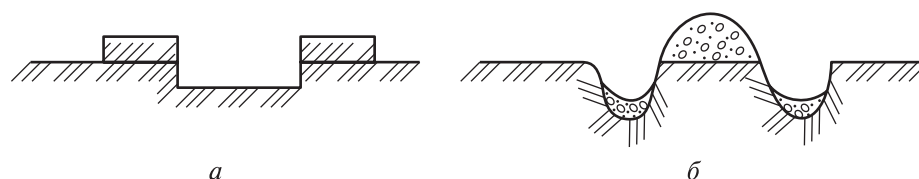


Рис. 1. Способы создания лесных культур на влажных почвах по краям борозд в отваленные пласты (а) или грядами (б)

Fig. 1. Methods of creating forest culture on moist soils: along the edges of the furrows into turning of layers (a) or ridges (b)

и подъем грунтовых вод, но имеет временный характер [9].

Эффективное выполнение технологических операций по лесовосстановлению в задаваемых продленным до 2030 г. федеральным проектом «Сохранение лесов» объемах невозможно без применения средств механизации работ, в частности по подготовке почвы и дальнейшему уходу за лесными культурами, в том числе в зонах таежных и широколиственных лесов бореальных широт [10]. Важность использования эффективных орудий и машин для обработки лесных почв отражена в работах [11–14], из которых также следует необходимость использования современных технических средств в практической деятельности лесоводов для комплексной механизации лесохозяйственного производства и обработки почвы как наиболее трудоемкой операции.

Согласно общепринятым правилам лесовосстановления на влажных почвах рекомендуется применять следующие две основные технологии подготовки микроповышений поверхности (рис. 1) [15–17]:

- посадка лесных культур по краям борозд в отваленные пласты (рис. 1, а) — для зоны смешанных и лиственных лесов на влажных, сырых и избыточно увлажненных почвах;

- высаживание посадочного материала в насыпи в виде дискретных холмиков или линейных гряд или создание канав с отвальными пластами (рис. 1, б) — на временно или избыточно увлажненных почвах.

При создании микроповышения на поверхности восстанавливаемой площади необходимо проанализировать природно-производственные условия и изучить рельеф местности, затем выбрать оптимальную технологию посадки в целях предотвращения или уменьшения негативного воздействия влаги на созданные культуры [18–23]. Исследования показывают, что у саженцев, высаженных на микроповышениях, корневая система развивается более симметрично, в то время как в бороздах корни саженцев произрастают преимущественно параллельно созданному углублению [24].

Дискретные возвышения на поверхности вырубки в виде холмиков создаются на участках, где имеется значительное количество препятствий в пределах относительно небольших площадей или рельеф местности не позволяет создать линейное насаждение [25]. В связи с этим нет возможности провести расчистку площади, что уменьшает потенциал механизации дальнейших работ по уходу за насаждениями. Исходя из этого, линейные микроповышения в виде гряд или пластов предпочтительнее и имеют некоторые преимущества при создании лесных культур, что подтверждают ранее проведенные исследования [26]. Например, в работе Б.А. Мочалова отмечен факт наличия преимущества в развитии лесных культур сосны с закрытой корневой системой (ЗКС), созданных по отвальным пластам по сравнению с посадкой на целине вследствие лучших условий для питания растений [27]. В статье [28] представлен сделанный на основании собранных данных вывод о существенно худших показателях роста культур на дискретных микроповышениях, чем на грядах или пластах.

В большом количестве лесных орудий, предназначенных для образования гребней, гряд или пластов как отечественного, так и зарубежного производства, согласно опыту их эксплуатации имеются некоторые недостатки. В частности, большинство орудий не создает достаточно уплотненного микроповышения при его прокладке, что увеличивает сроки создания лесных насаждений.

Для повышения качества линейных гребней при выполнении лесовосстановительных работ была создана конструкция лесного плуга (рис. 2, а) [29], состоящая из рамы 1 с механизмом навески, дисковых ножевых батарей 2, правооборачивающего лемешного корпуса 3 и левооборачивающего корпуса 4, сферических дисков 5, которые совместно подрезают и перемещают подрезанные пласты почвы к центру неводеланной полосы с одновременным их оборотом, и уплотняющего катка 6 для формирования профиля гребня и его уплотнения.

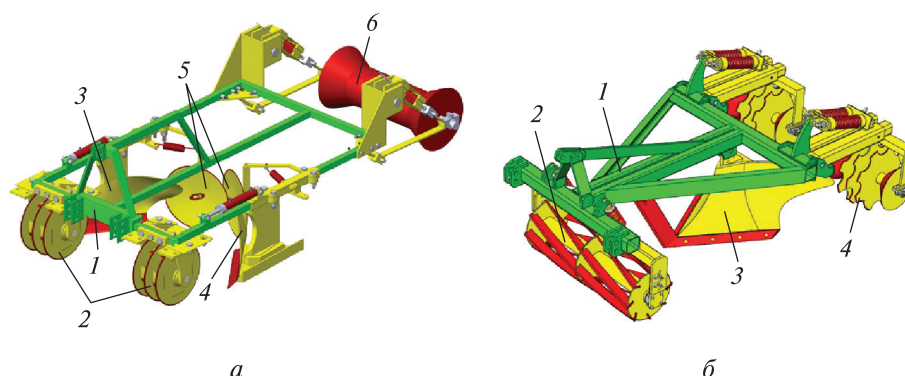


Рис. 2. Разрабатываемые лесные плуги для создания линейных микроповышений поверхности в виде гряд (*а*) или отвальных пластов (*б*)

Fig. 2. Woodland ploughs being developed for formation linear microhills of the surface in the form of ridges (*a*) or turning of seams (*b*)

Качественное микроповышение поверхности в виде отвальных по обе стороны пластов формируется разрабатываемым лесным плугом (рис. 2, *б*). Среди элементов конструкции орудия основными являются рама 1, ножевой барабан 2, двухотвальный лемешный корпус 3 для создания борозды и дополнительные катки-рыхлители 4 для измельчения и уплотнения отвальных почвенных масс.

Цель работы

Цель работы — исследование массоинерционных характеристик разрабатываемых лесных плугов, предназначенных для образования микроповышений поверхности в виде линейных гребней или отвальных пластов, для оценки расположения центра масс и подбора агрегируемого трактора.

Материалы и методы

Исследования массоинерционных характеристик проектируемых орудий проводились с помощью современных CAD-систем автоматизированного проектирования. Данный подход, в отличие от традиционных методик, дал возможность получить необходимые данные о проектируемом объекте с меньшими затратами временных и материальных ресурсов [30]. Исследование массоинерционных характеристик почвообрабатывающего агрегата позволяет упрощенно определить эффективную схему агрегирования с базовым трактором, а также провести динамические расчеты для машинно-тракторного агрегата (МТА) [31]. Результаты ранее выполненных работ показывают, что рационально реализованная компоновка разрабатываемого орудия в виде компактного разме-

щения его рабочих органов позволяет добиться снижения требуемой массы агрегируемого тягового средства, например в виде противовесов [32]. Кроме того, при исследовании применяли численный метод с использованием САПР.

Результаты и обсуждение

Начальный этап исследования заключался в оценке распределения массы орудий по узлам их конструкции. Построены эпюры поверхностей распределения массы по элементам конструкции разрабатываемых плугов (рис. 3).

Полученные данные показали, что наибольшей массой в конструкции плуга для линейных гряд обладают работающие всвал лемешно-отвальный корпуса и уплотняющий каток (рис. 3, *а*), а в плуге для отваливания пластов — двухотвальный лемешный корпус и катки-рыхлители (рис. 3, *б*).

Значительная масса данных узлов обусловлена их металлоемкостью, поскольку их корпуса подвергаются основной динамической нагрузке при отделении пласта почвы от основного массива, в связи с чем им необходимо иметь повышенную прочность. В свою очередь, катки должны достаточно хорошо уплотнять микроповышение и формировать его профиль, а в плуге, отваливающем пласты по краям борозды, — дополнительно измельчать почву, что также требует повышенной массы данных элементов конструкции. Кроме того, большую металлоемкость имеют и дисковые ножевые батареи. В процессе работы они подвергаются нагрузке при смятии растительности и при наезде на препятствия в виде небольших пней и корней, поэтому им следует иметь достаточную прочность (рис. 4).

Основные массоинерционные характеристики исследуемых конструкций представлены в табл. 1 и 2.

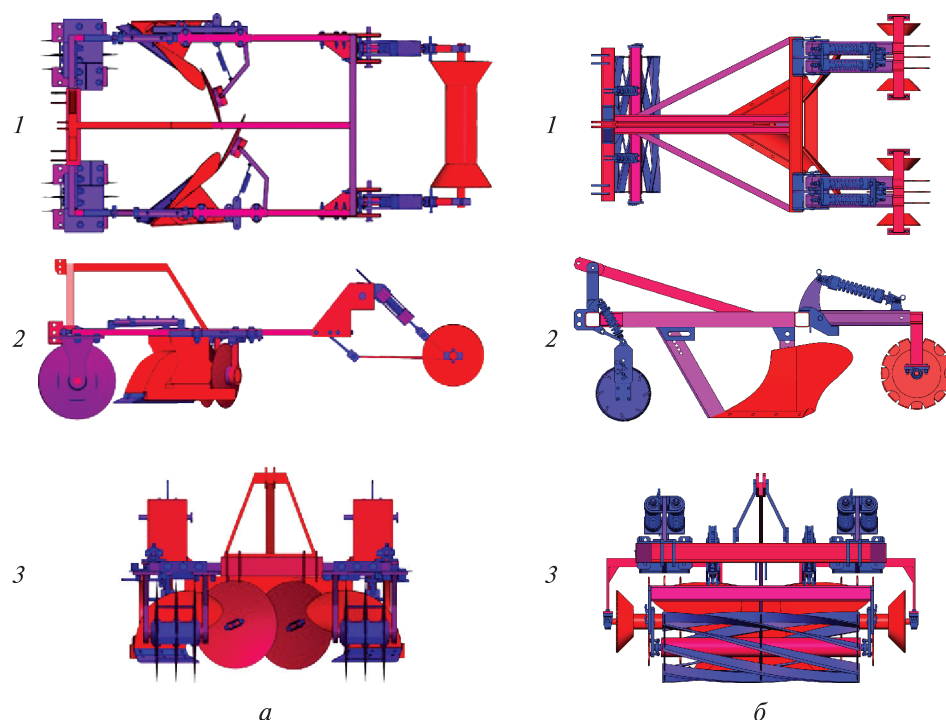


Рис. 3. Поверхностные массовые эпюры разрабатываемых лесных плугов для создания линейных гряд (*а*) и отваливания пластов (*б*): 1 — вид сверху; 2 — вид сбоку; 3 — вид спереди; для наиболее тяжелых узлов конструкции использован красный цвет

Fig. 3. Surface mass diagrams of woodland plows being developed for creating linear ridges (*a*) and dumping layers (*б*): 1 — top view; 2 — side view; 3 — front view; red color is used for the heaviest components of the structure

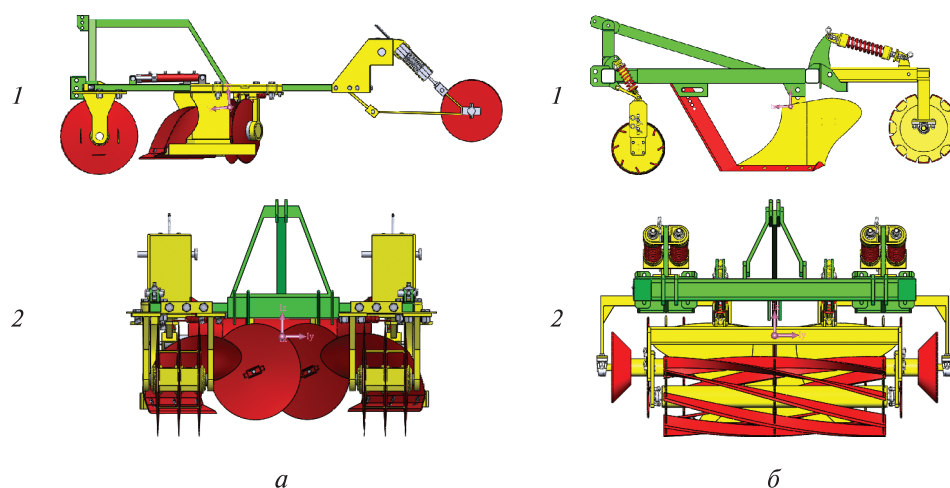


Рис. 4. Массоинерционные характеристики разрабатываемых лесных плугов для создания линейных гряд (*а*) и отваливания пластов (*б*): 1 — вид сбоку; 2 — вид спереди

Fig. 4. Massinertial characteristics of the developed forest plows for creating linear ridges (*a*) and turning of seams (*б*): 1 — side view; 2 — front view

Ввиду высокой металлоемкости и больших габаритов плуг для линейных гряд имеет массу 1500 кг, что требует применения тяговых средств класса от 3 тс. Масса плуга для соз-

дания микроповышений в виде отваленных пластов составляет около 630 кг, что позволяет для агрегатирования с ним использовать менее мощные тракторы класса 1,4...2 тс.

Т а б л и ц а 1

**Массоинерционные характеристики плуга
для создания микроповышений**
Massinertial characteristics of a plow for creating microhills

Наименование параметра	Единица измерения	Числовое значение
Масса плуга	кг	1469,84
Центр тяжести	м	$x = 0,01$ $y = -1,14$ $z = -2,00$
Основные оси инерции	м	$l_x = (-0,01, -0,10, 0,99)$ $l_y = (1,00, 0,00, 0,01)$ $l_z = (0,00, 0,99, 0,10)$
Основные моменты инерции	кг·м ²	$P_x = 1372,66$ $P_y = 4197,00$ $P_z = 5185,37$
Моменты инерции относительно системы координат	кг·м ²	$l_{xx} = 4196,78; l_{yx} = -1,07; l_{zx} = -25,58$ $l_{yx} = -1,07; l_{yy} = 5146,21; l_{yz} = -384,36$ $l_{zx} = -25,58; l_{zy} = -384,36; l_{zz} = 1412,0$

Т а б л и ц а 2

**Массоинерционные характеристики плуга
для создания отваливания пластов**
Massinertial characteristics of a plow for turning of seams

Наименование параметра	Единица измерения	Числовое значение
Масса плуга	кг	622,91
Центр тяжести	м	$x = -1,25$ $y = 0$ $z = -0,21$
Основные оси инерции	м	$l_x = (1, 0, -0,02)$ $l_y = (0, 1, 0)$ $l_z = (0,02, 0, 1)$
Основные моменты инерции	кг·м ²	$P_x = 134,53$ $P_y = 387,06$ $P_z = 442,08$
Моменты инерции относительно системы координат	кг·м ²	$l_{xx} = 134,61; l_{yx} = 0,04; l_{zx} = -4,8$ $l_{yx} = 0,04; l_{yy} = 387,06; l_{yz} = -0,01$ $l_{zx} = -4,8; l_{zy} = -0,01; l_{zz} = 442$

Согласно габаритным параметрам и распределению массы по конструкциям было найдено положение центра масс разрабатываемых орудий (рис. 5).

Анализ полученной визуализации показал, что центр масс спроектированных орудий лежит на оси симметрии конструкций. Для плуга, образующего линейные гряды, центр масс располагается между корпусами и сферическими дисками (рис. 5, а), а в плуге для отваливания пластов — непосредственно в плоскости двухотвального корпуса (рис. 5, б). Ввиду отсутствия дополнительных опорных

колес основными точками опоры в каждой из конструкций будут дисковые ножевые батареи, опирающиеся на пластинчатые ножи, либо ножевой барабан, лемешно-отвальные корпуса, опирающиеся на дно борозды, а также каток-формообразователь или катки-рыхлители, воздействующие на микроповышения поверхности в виде гряды или пластов, что обеспечит равномерный ход орудий на заданной глубине обработки лесной почвы [29]. Однако в плуге для создания линейных гряд в зависимости от условий эксплуатации при необходимости возможно продольное разведение рабочих сек-

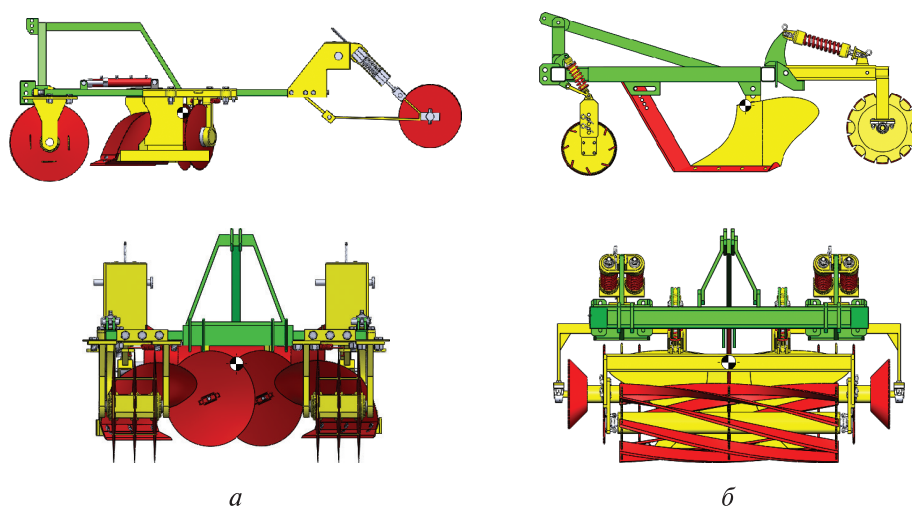


Рис. 5. Положение центра масс разрабатываемых лесных плугов для создания линейных гряд (*а*) и отваливания пластов (*б*)

Fig. 5. The position of the center of mass of the developed woodland plows for creating linear ridges (*a*) and turning of seams (*b*)

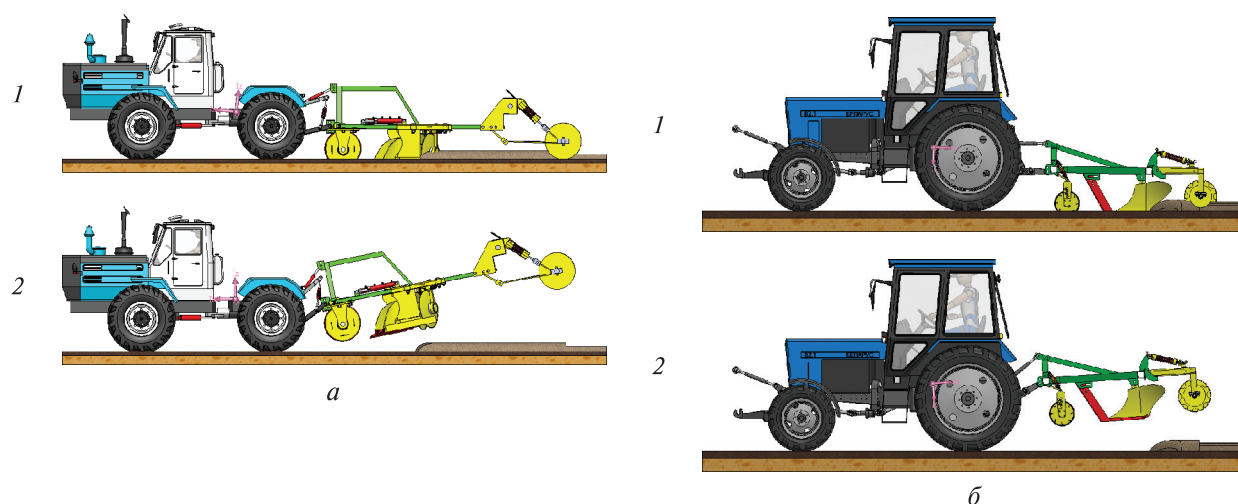


Рис. 6. Агрегатирование лесных плугов с базовыми тракторами для создания линейных гряд в составе агрегата, где тяговое средство трактор Т-150К (*а*), и отваливания пластов, агрегатируемый с трактором МТЗ-82.3 (*б*): 1 — рабочее положение; 2 — транспортное положение

Fig. 6. Aggregation of forest plows with base tractors for the creation of linear ridges as part of the unit, where the traction vehicle is the T-150K tractor (*a*), and for the dumping of layers, aggregated with the MTZ-82.3 tractor (*b*): 1 — working position; 2 — transport position

ций «корпус — сферический диск», вследствие чего центр масс орудия может незначительно смещаться на заднюю часть плуга.

Для уточнения компоновки конструкций была проведена проработка схем агрегатирования разрабатываемых плугов в среде CAD (рис. 6).

Анализ схемы агрегатирования показал, что разрабатываемый плуг для создания микроповышений в виде гряд в конкретном конструктивном исполнении можно использовать

в составе агрегата на базе тракторов и иных тяговых средств, в конструкции которых имеется навесное устройство большого угла подъема.

Менее энергоемкий трактор класса 1,4...2 тс, агрегатируемый с плугом для создания микроповышений в виде отваленных пластов, позволяет получить более компактный и менее воздействующий на опорную поверхность почвообрабатывающий агрегат, что имеет важное значение в условиях леса.

Т а б л и ц а 3

Параметры моделирования для подзолистой почвы

Modeling parameters for podzolic soil

Наименование параметра	Единица измерения	Числовое значение		
Влажность почвы, W	%	9...10	30...48	50...90
Плотность почвы, ρ	г/см ³	1,28	1,04	0,93
Скорость движения агрегата	км/ч	2,88	3,6	4,2
Время контакта при липкости 0,05 Н/см ²	с	0,152	0,123	0,111
		0,190	0,153	0,138
		0,222	0,179	0,161
Коэффициент трения почвы о сталь, f	—	0,35	0,85	0,58

Определение необходимых энергетических характеристик МТА для разрабатываемых орудий было проведено на основе теоретического исследования. В комплекс параметров математической модели, описываемой уравнением динамики поступательного движения, вошли следующие характеристики [34, 35]:

$F_{\text{тер}}$ — сила тяги тягового средства;

W — влажность почвы;

v — скорость движения МТА;

ρ — плотность почвы;

γ — угол трения почвы о сталь;

μ — липкость почвы.

Влажность почвы W выразили через плотность ρ , поскольку все перечисленные параметры взаимосвязаны. Исследование было выполнено на основе параметров подзолистой почвы (табл. 3). Значения влажности варьировались в пределах от 9 до 75 %, скорость МТА — от 2,88 до 4,2 км/ч.

В качестве классификационного параметра принято использовать значение номинального тягового усилия (ГОСТ 27021–86), т. е. усилия, соответствующего максимальному тяговому КПД трактора, при котором можно достичь наиболее полного использования его тягово-энергетических свойств. Тяговые классы тракторов согласно ГОСТ 27021–86 и значение силы тяги приведены в табл. 4.

Для определения тягового класса трактора использовался параметр, определяемый соотношением

$$\delta = \frac{f(M + M_{\text{т}})g}{F_{\text{т ср}}},$$

где f — коэффициент сопротивления качению;

M — масса плуга, кг;

$M_{\text{т}}$ — масса трактора, кг;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

$F_{\text{т ср}}$ — соответствует выбранному тяговому классу (см. табл. 4), Н.

Т а б л и ц а 4

Тяговые классы тракторов и их характеристика

Tractor traction classes and their characteristics

Номинальная тяговая сила (тяговый класс), тс	Минимальное значение силы тяги трактора $F_{\text{т min}}$, кН	Максимальное значение силы тяги трактора $F_{\text{т max}}$, кН	Среднее значение силы тяги трактора $F_{\text{т ср}}$, кН
1,4	12,6	18	15,3
2	18	27	22,5
3	27	36	31,5
4	36	45	40,5
5	45	54	49,5

Коэффициент δ , рассчитанный в процентах, показывает, как соотносятся необходимая сила тяги и номинальная тяговая сила трактора.

Рассчитаны также параметры модели для плуга, создающего линейные гряды (табл. 5), и для плуга, отваливающего пласты (табл. 6).

В ходе теоретических исследований получены результаты поиска необходимого тягового класса трактора для агрегатирования с разрабатываемыми плугами при учете параметров почвы и скорости движения (рис. 7, 8).

Как видно из рис. 7 для плуга, образующего микроповышения в виде гряд, требуется тяговое средство 3 класса тяги и выше, что объясняется достаточно большой массой плуга и изменением влажности почвы. С увеличением влажности почвы с 9 до 40 % сначала наблюдается увеличение тягового сопротивления, а затем его уменьшение при влажности почвы, равной 75 %, при неизменных значениях параметров плуга. Это связано с уменьшением

Т а б л и ц а 5

Параметры для плуга, образующего линейные гряды**Parameters for a plough forming linear ridges**

Наименование параметра	Единица измерения	Обозначение	Числовое значение
Масса трактора	кг	M_T	4000
Ускорение свободного падения	м/с ²	g	9,86
Глубина пласта	мм	H	250
Ширина пласта	мм	L	350
Угол между отвалом и стенкой борозды	град	θ	35
Начальный угол подъема грунта	град	α	20
КПД мощности трактора	—	η_T	0,98
Коэффициент трения почвы о сталь	—	μ	0,58
Коэффициент сопротивления качению	—	f	0,05
Коэффициент эксплуатационной нагрузки	—	K_3	0,8
Максимальная масса срезаемого пласта	кг	m_s	37,33983
Слой налипания частиц почвы	мм	G_n	2
Коэффициент динамической вязкости	—	χ	$2 \cdot 10^6$
Масса орудия	кг	M	1470

Т а б л и ц а 6

Параметры для плуга, отваливающего пласты по краям борозды**Parameters for a plow turning of seams along the edges of a furrow**

Наименование параметра	Единица измерения	Обозначение	Числовое значение
Масса трактора	кг	M_T	4000
Ускорение свободного падения	м/с ²	g	9,86
Глубина пласта	мм	H	150
Ширина пласта	мм	L	700
Угол между отвалом и стенкой борозды	град	θ	35
Начальный угол подъема грунта	град	α	20
КПД мощности трактора	—	η_T	0,98
Коэффициент трения почвы о сталь	—	μ	0,58
Коэффициент сопротивления качению	—	f	0,05
Коэффициент эксплуатационной нагрузки	—	K_3	0,8
Максимальная масса срезаемого пласта	кг	m_s	37,33983
Слой налипания частиц почвы	мм	G_n	2
Коэффициент динамической вязкости	—	χ	$2 \cdot 10^6$
Масса орудия	кг	M	615

связности почвенных частиц и созданием излишней влагой подложки между почвой и рабочей поверхностью корпуса, что, в совокупности, уменьшает сопротивление орудия. При этом скорость агрегируемого трактора не влияет на величину сопротивления.

Для плуга, предназначенного для отваливания пластов (рис. 8), применим трактор 1,4 тягового класса при небольшой влажности почвы (от 9 до 40 %) и 3 тягового класса при высоких значениях влажности. При этом скорость МТА также не влияет на тяговое сопротивление.

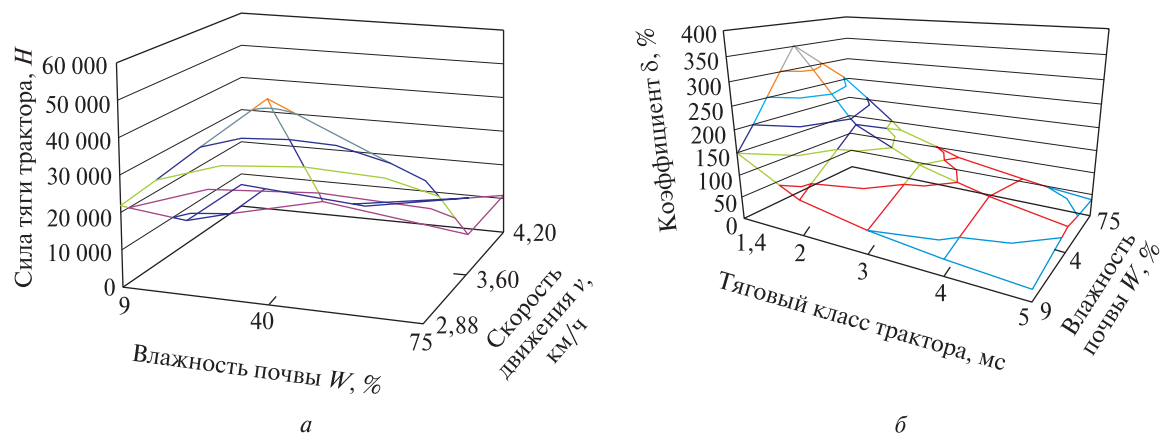


Рис. 7. Результаты оптимизации для плуга, предназначенного для создания линейных гряд
Fig. 7. Optimization results for a plow for creating linear ridges

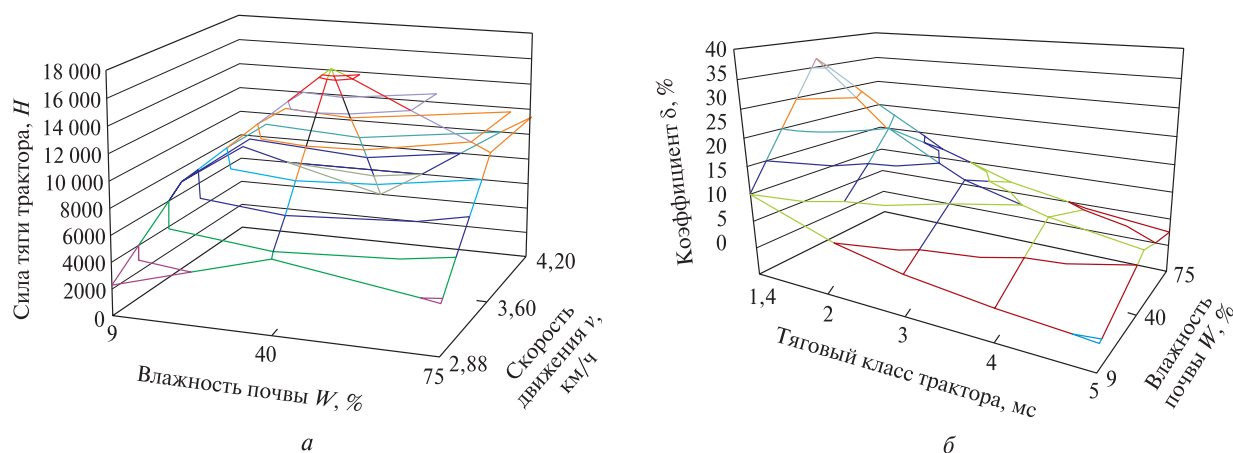


Рис. 8. Результаты оптимизации для плуга, отваливающего пласты
Fig. 8. Optimization results for a plow turning of seams

Таким образом, в качестве одного из возможных критериев оценки эффективности рабочего процесса плугов можно использовать массу перемещаемой почвы [14], а по ней рассчитать необходимую силу тяги, а затем по параметру δ (%) определить минимальный тяговый класс трактора. В качестве основных параметров эффективности целесообразно выбрать максимальную величину микроповышения или максимальную разность высоты микроповышения по периметру формируемой полосы. Еще одним параметром для сравнения лесных плугов с различными конструктивными параметрами может стать интервал перемещения частиц почвы.

Выводы

Определение массоинерционных характеристик проектируемых орудий позволило установить, что общая масса плугов составляет 1470 кг

и 622 кг соответственно и оценить распределение массы орудий согласно их конструктивному исполнению.

Выполнена оценка схемы агрегатирования орудий с базовым трактором. По итогам теоретических исследований на основе математического моделирования установлено, что числитель в соотношении практически не зависит от скорости движения трактора. При этом величина коэффициента δ соотношения необходимой силы тяги к номинальной тяговой силе трактора существенно меняется с изменением влажности почвы и тягового класса трактора в достаточно широком диапазоне. При влажности почвы W в диапазоне от 9 до 40 % происходит увеличение коэффициента δ с 20 до 350 % для плуга, образующего линейные гряды, и от 4 до 40 % для плуга, создающего микроповышение отвальными пластами, что говорит о возрастании силы сопротивления почвы при ее обработке.

Разработан и применен принцип сравнительной оценки параметров проектируемых плугов, характеристик почвы и величины тяги тракторов для нахождения оптимального состава МТА с учетом выбранной технологии обработки почвы при лесовосстановлении. С учетом характеристик почвы и параметров проектируемых орудий найдено оптимальное значение силы тяги трактора в составе МТА. В результате для плуга, создающего линейные гряды (величина силы сопротивления равна 33 000 Н), рекомендуется использовать трактор 3 класса тяги, а для плуга, отваливающего пласты (величина силы сопротивления равна 14 000 Н) — трактор 1,4 класса тяги.

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

Список литературы

- [1] Шварц Е.А., Шматков Н.М., Карпачевский М.Л., Байбар А.С. Вызовы и проблемы реформирования лесного хозяйства России // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2022. № 241. С. 157–172.
DOI: 10.21266/2079-4304.2022.241.157-172
- [2] Зекунова А.И. Оценка эффективности лесовосстановительных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2008. № 10. С. 278–283.
- [3] Белоусова С.В. Российские проблемы лесовосстановления (на примере Иркутской области) // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии, 2021. Т. 30. № 4. С. 27–35.
DOI: 10.24412/2073-1035-2021-10421
- [4] Башегуров К.А., Жигулин Е.В., Жижин С.М., Магасумова А.Г. Совершенствование лесовосстановления сосновых лесов подзоны северной тайги // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2020. № 58. С. 3–6.
- [5] Романов Е.М. Воспроизводство лесов в новой стратегии перехода к устойчивому развитию лесного сектора России // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование, 2021. № 1(49). С. 5–22. DOI: 10.25686/2306-2827.2021.1.5
- [6] Соколов А.И. Нормативы и практика лесовосстановления: ситуация в Республике Карелия // Интенсивное устойчивое лесное хозяйство: барьеры и перспективы развития. М.: Изд-во Всемирного фонда дикой природы, 2013. С. 103–110.
- [7] Ильинцев А.С., Шамонтьев И.Г., Третьяков С.В. Современная динамика лесопользования в бореальных лесах России (на примере Архангельской области) // Лесотехнический журнал, 2021. Т. 11. № 3(43). С. 45–62.
DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.3/4
- [8] Кутявин И.Н., Манов А.В., Старцев В.В., Дымов А.А. Влияние лесозаготовительной техники на динамику естественного возобновления леса после рубки хвойно-лиственного насаждения средней тайги // Теоретическая и прикладная экология, 2024. № 3. С. 123–132.
DOI: 10.25750/1995-4301-2024-3-123-132
- [9] Хитров Н.Б., Чевердин Ю.И. Причины возникновения и география временно переувлажненных и затопленных почв Каменной степи // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева, 2007. № 59. С. 3–13.
- [10] Филипчук А.Н., Малышева Н.В., Золина Т.А., Югов А.Н. Бореальные леса России: возможности для смягчения изменения климата // Лесохозяйственная информация, 2020. № 1. С. 92–114.
DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2020.1.10
- [11] Бартенев И.М. Значение основной обработки почвы в развитии растений древесно-кустарниковых пород // Лесотехнический журнал, 2015. Т. 5. № 2(18). С. 149–158. DOI: 10.12737/111989
- [12] Ильинцев А.С., Романов Е.М., Воронин В.В., Богданов А.П. Современная практика искусственного лесовосстановления в таежной зоне Европейской части России // ИзВУЗ Лесной журнал, 2024. № 1(397). С. 52–64. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-52-64
- [13] Löf M., Dey D.C., Navarro R.M., Jacobs D.F. Mechanical site preparation for forest restoration // New Forests, 2012, no. 43, pp. 825–848.
DOI: 10.1007/s11056-012-9332-x
- [14] Uotila K., Rantala J., Saksa T., Hartstela P. Effect of soil preparation method on economic result of Norway spruce regeneration chain // Silva Fennica, 2010, no. 44 (3), pp. 511–524. DOI: 10.14214/sf.146
- [15] Калиниченко Н.П., Писаренко А.И., Смирнов Н.А. Лесовосстановление на вырубках. М.: Лесная пром-сть, 1973. 326 с.
- [16] Дручинин Д.Ю., Шавков М.В., Фатхулин В.Р., Болгов А.В. Совершенствование конструкций орудий для обработки почвы под посадку лесных культур в пласт // Resources and Technology, 2024. Т. 21. № 1. С. 40–52. DOI: 10.15393/j2.art.2024.7423
- [17] Шпагин Д.Е., Коршун В.Н. Лесовосстановление на переувлажненных почвах мерзлотной зоны Сибири // Лесозаготовка и комплексное использование древесины: сб. статей Всерос. науч.-практ. конф., Красноярск, 10 марта 2021 г. Красноярск: Изд-во Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2021. С. 291–294.
- [18] Казаков В.И., Проказин Н.Е., Лобанова Е.Н. Особенности создания и роста культур ели на вырубках с влажными и временно переувлажненными почвами // Лесотехнический журнал, 2013. № 1(9). С. 32–42.
- [19] Sikström U., Hjelm K., Holt Hanssen K., Saksa T., Wallertz K. Influence of Mechanical Site Preparation on Regeneration Success of Planted Conifers in Clearcuts in Fennoscandia – a Review // Silva Fennica, 2020, v. 54, no. 2, art. no. 10172. DOI: 10.14214/sf.10172
- [20] Бобушкина С.В., Тараканов А.М. Условия успешного лесовосстановления на переувлажненных вырубках Архангельской области // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: Материалы Третьей Междунар. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 23–24 мая 2018 г. СПб: Изд-во СПбГЛТУ им. С.М. Кирова, 2018. С. 38–40.
- [21] Проказин Н.Е., Казаков В.И., Лобанова Е.Н. Влияние способов обработки влажных и переувлажнен-

- ных почв на рост культур ели // Лесохозяйственная информация, 2013. № 1. С. 21–25.
- [22] Bassman J.H. Influence of two site preparation treatments on ecophysiology of planted *Picea engelmannii* × *glauca* seedlings // Canadian J. of Forest Research, 1989, no. 19 (11), pp. 1359–1370. DOI: 10.1139/x89-210
- [23] Nordin P. Regeneration measures in time and space: Site preparation, planting and digital tools. Växjö: Linnaeus University Press, 2023, 62 p. DOI: 10.15626/LUD.489.2023
- [24] Duminš K., Žigure S., Celma S., Štals T.A., Vendina V., Zuševica A., Lazdina D. Impact of soil preparation method and stock type on root architecture of Scots Pine, Norway Spruce, Silver Birch and Black Alder // Forests, 2025, no. 16 (5), p. 830. DOI: 10.3390/f16050830
- [25] Häggström B., Hajek J., Nordin A., Öhlund J. Effects of Planting Position, Seedling Size, and Organic Nitrogen Fertilization on the Establishment of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst) Seedlings // Forests, 2024, no. 15 (4), p. 703. DOI: 10.3390/f15040703
- [26] Ильинцев А.С., Наквасина Е.Н., Богданов А.П., Парамонов А.А. Опыт создания лесных культур на микроповышениях при экскаваторной обработке почвы // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 2. С. 5–16. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-5-16
- [27] Угрюмов Б.И., Ильин И.М., Яремчук Р.И. Воспроизводство лесов. Основные моменты // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки — развитию регионов Сибири, 2007. Т. 1. С. 36–39.
- [28] Мочалов Б.А. Подготовка почвы и выбор посадочного места при создании лесных культур сосны из семян с закрытыми корнями // ИзВУЗ Лесной журнал, 2014. № 4(340). С. 9–18.
- [29] Маркова И.А. Влияние технологии выращивания на развитие и строение корней сосны и ели в лесных культурах // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, 2010. № 1(21). С. 136–149.
- [30] Патент № 2789357 Российская Федерация, МПК А01В 13/02 (2006.1), А01В 49/02 (2006.1), А01G 23/00 (2006.1). Лесной плуг для образования микроповышений: № 2022119496: заявл. 16.07.2022: опубл. 02.02.2023 / Дручинин Д.Ю., Попов М.А., заявитель ФГБОУ ВО «ВГЛТУ имени Г.Ф. Морозова». 9 с.
- [31] Киреев И.М., Коваль З.М. Экспериментально-теоретический метод определения продольной и поперечной статической устойчивости сельскохозяйственных агрегатов // АгроФорум, 2019. № 6. С. 58–62.
- [32] Лысыч М.Н. Исследование массово-инерционных характеристик лесохозяйственного МТА на базе трактора Беларус-82.1 // Интеграция и развитие научно-технического и образовательного сотрудничества — взгляд в будущее: сб. статей II Междунар. науч.-техн. конф. В 3-х т., Минск, 11–12 декабря 2019 г. Минск: Изд-во БГТУ, 2020. Т. 2. С. 127–130.
- [33] Припоров Е.В. Пути повышения продольной устойчивости навесных агрегатов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета, 2017. № 3(65). С. 93–95.
- [34] Дручинин Д.Ю., Камалова Н.С., Попов М.А. Формализованная модель перемещения почвы по поверхностям рабочих органов лесного плуга для образования микроповышений // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2023. № 245. С. 200–214. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.200-214
- [35] Попов М. А. Общая концепция формализованной модели рабочего процесса лесного плуга для образования микроповышений // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: Материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 24–26 мая 2023 г. СПб: Изд-во СПбГЛТУ, 2023. С. 561–565.

Сведения об авторах

Дручинин Денис Юрьевич  — канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» (ВГЛТУ), druchinin.denis@rambler.ru

Попов Максим Александрович — канд. техн. наук, преподаватель, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» (ВГЛТУ), porovmaxim98@mail.ru

Лысыч Михаил Николаевич — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» (ВГЛТУ), miklynea@yandex.ru

Фатхулин Вадим Русланович — аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» (ВГЛТУ), injener25776@mail.ru

Гнусов Максим Александрович — д-р. техн. наук, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» (ВГЛТУ), mgusov@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.12.2025.

Одобрено после рецензирования 10.02.2026.

Принята к публикации 24.03.2026.

WOODLAND PLOUGHS BARICENTRIC PARAMETRES RESEARCH USING COMPUTING ENGINEERING TOOLS

D.Yu. Druchinin✉, M.A. Popov, M.N. Lysych,
V.R. Fatkhulin, M.A. Gnusov

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev st., 394087, Voronezh, Russia

druchinin.denis@rambler.ru

The necessity of developing modern models of equipment for cultivation forest soil, including those with an increased degree of moisture, has been determined. Soil cultivation in such conditions is carried out by creating microhills of the surface in the form of soil borders, ridges or turning of seams. The developed designs of woodland ploughs are presented, for which a study of their mass-inertia characteristics based on the designed 3D models was carried out. Using CAD, the mass distribution across the studied structures detail part was estimated, which made it possible, taking into account the overall dimensions, to find the location of the developed ploughs center of mass. In the CAD environment, a scheme for unitizing combined implements with basic tractors of drawbar category 3 and 1,4 tf was developed. In order to determine the necessary energy characteristics of the machine-tractor unit for the tools being developed, a theoretical study was conducted based on mathematical modeling of the ploughs working process. In this case, the value of the tractors nominal traction power is used as a classification parameter. By calculating a special coefficient, the ratio of the required traction power to the tractor rated traction power was estimated. Taking into account the parameters of the cultivated soil and the designed tools, a study was conducted to find the optimal value of the tractor traction power as part of a machine-tractor unit. As a result, for aggregation with forest ploughs that cultivation waterlogged soil with increased traction resistance by creating linear ridges or turning of seams along the edges of the furrow, it is recommended to use a tractor with a traction class of 3 tf or higher or a tractor with a traction class of 1,4 tf, respectively.

Keywords: woodland plough, microhill, 3D-model, barycentric parametres, haulage equipment, tractor draft force

Suggested citation: Druchinin D.Yu., Popov M.A., Lysych M.N., Fatkhulin V.R., Gnusov M.A. *Issledovanie massoinertsionnykh kharakteristik lesnykh plugov s ispol'zovaniem sredstv komp'yuternogo inzhiniringa* [Woodland ploughs baricentric parametres research using computing engineering tools]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 4, pp. 122–135. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-4-122-135

References

- [1] Schwartz E.A., Shmatkov N.M., Karpachevsky M.L., Baibar A.S. *Vyzovy i problemy reformirovaniya lesnogo khozyaystva Rossii* [Challenges and problems of reforming forestry in Russia]. *Izvestiya Sankt-Petersburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy], 2022, no. 241, pp. 157–172. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.241.157-172
- [2] Zekunova A.I. *Otsenka effektivnosti lesovosstanovitel'nykh rabot* [Evaluation of the effectiveness of forest restoration works]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], 2008, no. 10, pp. 278–283.
- [3] Belousova S.V. *Rossiyskie problemy lesovosstanovleniya (na primere Irkutskoy oblasti)* [Russian problems of reforestation (on the example of the Irkutsk region)]. *Samarskaya Luka: problemy regional'noy i global'noy ekologii* [Samara Luka: problems of regional and global ecology], 2021, v. 30, no. 4, pp. 27–35. DOI: 10.24412/2073-1035-2021-10421
- [4] Bashegurov K.A., Zhigulin E.V., Zhizhin S.M., Magasumova A.G. *Sovershenstvovanie lesovosstanovleniya osnovnykh lesov podzony severnoy taygi* [Improvement of forest recovery of pine forest in the northern taiga subzone]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2020, no. 58, pp. 3–6.
- [5] Romanov E.M. *Vosproizvodstvo lesov v novoy strategii perekhoda k ustoychivomu razvitiyu lesnogo sektora Rossii* [Regeneration of forests in a new strategy for the transition to the sustainable development of Russian forest sector]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga Region State Technological University. Series: Forests. Ecology. Nature Management], 2021, no. 1(49), pp. 5–22. DOI: 10.25686/2306-2827.2021.1.5
- [6] Sokolov A.I. *Normativy i praktika lesovosstanovleniya: situatsiya v Respublike Kareliya* [Standards and practice of reforestation: the situation in the Republic of Karelia]. *Intensivnoe ustoychivoe lesnoe khozyaystvo: bar'ery i perspektivy razvitiya* [Intensive sustainable forestry: barriers and development prospects.]. Moscow: Vsemirnyy fond dikoy prirody, 2013, pp. 103–110.
- [7] Il'intsev A.S., Shamont'ev I.G., Tret'yakov S.V. *Sovremennaya dinamika lesopol'zovaniya v boreal'nykh lesakh Rossii (na primere Arkhangel'skoy oblasti)* [Modern dynamics of forest use in the boreal forests of Russia (for example of the Arkhangelsk region)]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering J.], 2021, t. 11, no. 3(43), pp. 45–62. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.3/4

- [8] Kutyavin I.N., Manov A.V., Startsev V.V., Dymov A.A. *Vliyanie lesozagotovitel'noy tekhniki na dinamiku estestvennogo vozobnovleniya lesa posle rubki khvoynno-listvennogo nasazhdeniya sredney taygi* [The logging equipment effect on the dynamics of natural reforestation of after cutting mixed coniferous-deciduous stand in the middle taiga]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and Applied Ecology], 2024, no. 3, pp. 123–132. DOI: 10.25750/1995-4301-2024-3-123-132
- [9] Khitrov N.B., Cheverdin Yu.I. *Prichiny vozniknoveniya i geografiya vremenno pereuvlazhennyykh i zatoplennykh pochv Kamennoy stepi* [Causes of occurrence and geography of temporarily waterlogged and flooded soils of the Kamennaya Steppe]. *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva* [Dokuchaev Soil Bulletin], 2007, no. 59, pp. 3–13.
- [10] Filipchuk A.N., Malysheva N.V., Zolina T.A., Yugov A.N. *Boreal'nye lesa Rossii: vozmozhnosti dlya smyagcheniya izmeneniya klimata* [The boreal forest of Russia: opportunities for the effects of climate change mitigation]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2020, no. 1, pp. 92–114. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2020.1.10
- [11] Bartenev I.M. *Znachenie osnovnoy obrabotki pochvy v razvitiy rasteniy drevesno-kustarnikovyykh porod* [The value of primary tillage in the development of plant trees and shrubs]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering J.], 2015, v. 5, no. 2(18), pp. 149–158. DOI: 10.12737/111989
- [12] Il'intsev A.S., Romanov E.M., Voronin V.V., Bogdanov A.P. *Sovremennaya praktika iskusstvennogo lesovosstanovleniya v taezhnoy zone Evropeyskoy chasti Rossii* [Modern practice of artificial reforestation in the taiga zone of the European part of Russia]. *Russian Forestry J.*, 2024, no. 1(397), pp. 52–64. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-52-64
- [13] Löf M., Dey D.C., Navarro R.M., Jacobs D.F. Mechanical site preparation for forest restoration. *New Forests*, 2012, no. 43, pp. 825–848. DOI: 10.1007/s11056-012-9332-x
- [14] Uotila K., Rantala J., Saksa T., Hartstela P. Effect of soil preparation method on economic result of Norway spruce regeneration chain. *Silva Fennica*, 2010, no. 44 (3), pp. 511–524. DOI: 10.14214/sf.146
- [15] Kalinichenko N.P., Pisarenko A.I., Smirnov N.A. *Lesovosstanovlenie na vyrubkakh* [Reforestation in cutting-downs]. Moscow: Lesnaya prom-st', 1973, 326 p.
- [16] Druchinin D.Yu., Shavkov M.V., Fatkhulin V.R., Bolgov A.V. *Sovershenstvovanie konstruksiy orudiy dlya obrabotki pochvy pod posadku lesnykh kul'tur v plast* [Design improvement of soil-tilling tools for forest side planting]. *Resources and Technology*, 2024, v. 21, no. 1, pp. 40–52. DOI: 10.15393/j2.art.2024.7423
- [17] Shpagin D.E., Korshun V.N. *Lesovosstanovlenie na pereuvlazhennyykh pochvakh merzlotnoy zony Sibiri* [Forest recovery on not drained soils of the Siberian permafrost zone]. *Lesoeksploatatsiya i kompleksnoe ispol'zovanie drevesiny: sb. statey Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Forest exploitation and complex use of wood: collection of articles of the All-Russian scientific and practical conf.], Krasnoyarsk, March 10, 2021. Krasnoyarsk: Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, 2021, pp. 291–294.
- [18] Kazakov V.I., Prokazin N.E., Lobanova E.N. *Osobennosti sozdaniya i rosta kul'tur eli na vyrubkakh s vlazhnymi i vremenno pereuvlazhennymi pochvami* [Features of creation and growth of spruce species in clearings with wet and temporarily waterlogged soils]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering J.], 2013, no. 1(9), pp. 32–42.
- [19] Sikström U., Hjelm K., Holt Hanssen K., Saksa T., Wallertz K. Influence of Mechanical Site Preparation on Regeneration Success of Planted Conifers in Clearcuts in Fennoscandia – a Review. *Silva Fennica*, 2020, v. 54, no. 2, art. no. 10172. DOI: 10.14214/sf.10172
- [20] Bobushkina S.V., Tarakanov A.M. *Usloviya uspeshnogo lesovosstanovleniya na pereuvlazhennyykh vyрубkakh Arkhangel'skoy oblasti* [Conditions for successful reforestation in waterlogged clearings of the Arkhangelsk region]. *Les Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie: mater. tret'ey mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Forests of Russia: policy, industry, science, education: Proc. of the 3rd Int. scientific and technical. conf.], St. Petersburg, May 23–24, 2018. St. Petersburg: St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, 2018, pp. 38–40.
- [21] Prokazin N.E., Kazakov V.I., Lobanova E.N. *Vliyanie sposobov obrabotki vlazhnykh i pereuvlazhennyykh pochv na rost kul'tur eli* [Impacts of moist and water logged soils treatment patterns on spruce plantation growth]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2013, no. 1, pp. 21–25.
- [22] Bassman J.H. Influence of two site preparation treatments on ecophysiology of planted *Picea engelmannii* × *glauca* seedlings. *Canadian J. of Forest Research*, 1989, no. 19 (11), pp. 1359–1370. DOI: 10.1139/x89-210
- [23] Nordin P. Regeneration measures in time and space: Site preparation, planting and digital tools. Växjö: Linnaeus University Press, 2023, 62 p. DOI: 10.15626/LUD.489.2023
- [24] Duminš K., Žigūre S., Celma S., Štāls T.A., Vendina V., Zuševica A., Lazdina D. Impact of soil preparation method and stock type on root architecture of Scots Pine, Norway Spruce, Silver Birch and Black Alder. *Forests*, 2025, no. 16 (5), p. 830. DOI: 10.3390/f16050830
- [25] Häggström B., Hajek J., Nordin A., Öhlund J. Effects of Planting Position, Seedling Size, and Organic Nitrogen Fertilization on the Establishment of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst) Seedlings. *Forests*, 2024, no. 15 (4), p. 703. DOI: 10.3390/f15040703
- [26] Il'intsev A.S., Nakvasina E.N., Bogdanov A.P., Paramonov A.A. *Opyt sozdaniya lesnykh kul'tur na mikropovyshenyakh pri ekskavatornoy obrabotke pochvy* [Forest crops at spot mounds after excavator soil cultivation]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin* [Forestry Bulletin], 2024, vol. 28, no. 2, pp. 5–16. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-5-16
- [27] Ugryumov B.I., Il'in I.M., Yaremchuk R.I. *Vosproizvodstvo lesov. Osnovnye momenty* [Forest reproduction. Key points]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki — razvitiyu regionov Sibiri* [Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and engineering sciences – for the development of Siberian regions], 2007, vol. 1, pp. 36–39.
- [28] Mochalov B.A. *Podgotovka pochvy i vybor posadochnogo mesta pri sozdanii lesnykh kul'tur sosny iz seyantsev s zakrytymi korniyami* [Soil cultivation and selection planting site attached to pine artificial stands creation from containerized seedlings]. *Russian Forestry J.*, 2014, no. 4 (340), pp. 9–18.

- [29] Markova I.A. *Vliyaniye tekhnologii vyrashchivaniya na razvitiye i stroeniye korney sosny i eli v lesnykh kul'turakh* [The influence of cultivation technology on the development and structure of pine and spruce roots in forest crops]. Trudy Sankt-Peterburgskogo NII lesnogo khozyaystva [Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry], 2010, no. 1 (21), pp. 136–149.
- [30] Druchinin D.Yu., Popov M.A. *Lesnoy plug dlya obrazovaniya mikropovysheniy* [Forest plough for forming microhills]. Pat. 2789357 RF, IPS A01B 13/02, A01B 49/02, A01G 23/00 (2006.01); applicant and patent holder VSUFT named after G.F. Morozov. No. 2022119496; dec. 16.07.2022; publ. 02.02.2023.
- [31] Kireev I.M., Koval' Z.M. *Eksperimental'no-teoreticheskiy metod opredeleniya prodol'noy i poperechnoy staticheskoy ustoychivosti sel'skokhozyaystvennykh agregatov* [Experimental and theoretical method for determining the longitudinal and transverse static stability of agricultural units]. AgroForum [AgroForum], 2019, no. 6, pp. 58–62.
- [32] Lysych M.N. *Issledovanie massovo-inertsionnykh kharakteristik lesokhozyaystvennogo MTA na baze traktora Belarus-82.1* [Study of mass-inertial characteristics of forestry MTA based on the Belarus-82.1 tractor]. Integratsiya i razvitiye nauchno-tekhnicheskogo i obrazovatel'nogo sotrudnichestva — vzglyad v budushchee: sb. statey II Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. V 3-kh tomakh [Integration and development of scientific, technical and educational cooperation — a look into the future: collection of articles of the II Int. scientific and technical conf. In 3 volumes], Minsk, December 11–12, 2019, Vol. 2. Minsk: Belarusian State Technological University, 2020, pp. 127–130.
- [33] Priporov E.V. *Puti povysheniya prodol'noy ustoychivosti navesnykh agregatov* [Ways to increase longitudinal stability of mounted aggregates]. Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Izvestia Orenburg State Agrarian University], 2017, no. 3(65), pp. 93–95.
- [34] Druchinin D.Yu., Kamalova N.S., Popov M.A. *Formalizovannaya model' peremeshcheniya pochvy po poverkhnostyam rabochikh organov lesnogo pluga dlya obrazovaniya mikropovysheniy* [A formalized model of soil movement on the surfaces of the working bodies of a forest plow for the formation of microhill]. Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii [Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy], 2023, no. 245, pp. 200–214. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.200-214
- [35] Popov M.A. *Obshchaya kontseptsiya formalizovannoy modeli rabocheho protsessa lesnogo pluga dlya obrazovaniya mikropovysheniy* [General concept of a formalized model of the forest plough working process for the microhills formation]. Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie: mater. VIII Vserossiysk. nauch.-tekhn. konf. [Forests of Russia: policy, industry, science, education: materials of the VIII All-Russian scientific and technical conf.], St. Petersburg, May 24–26, 2023 St. Petersburg: St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, 2023, pp. 561–565.

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation 25-19-00876, <https://rscf.ru/project/25-19-00876/>.

Authors' information

Druchinin Denis Yur'yevich  — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, druchinin.denis@rambler.ru

Popov Maksim Aleksandrovich — Cand. Sci. (Tech.), Lecturer of the State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, popovmaksim98@mail.ru

Lysych Mikhail Nikolayevich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, miklynea@yandex.ru

Fatkulin Vadim Ruslanovich — pg. of the Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, injener25776@mail.ru

Gnusov Maksim Aleksandrovich — Dr. Sci. (Tech.) of the Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, mgnusov@yandex.ru

Received 01.12.2025.

Approved after review 10.02.2026.

Accepted for publication 24.03.2026.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest