



Моделирование процесса образования колеи при последовательном взаимодействии колес форвардера с твердыми препятствиями на трелевочном волокне с учетом влажности почвогрунта

Владимир Я. Шапиро¹, shapiro54vlad@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

Игорь В. Григорьев², silver73@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

Евгений В. Сибиряткин², jey-sib@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-0475-612X>

Евгений А. Тихонов⁴, tihonov@petsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

Павел Н. Перфильев⁵, savadf0706@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский переулок., д. 13, г. Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», шоссе Сергеляхское, 3 км, д 3, г. Якутск, 677007, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

⁴ ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация

⁵ ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, д 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация

Представлена математическая модель образования колеи при последовательном взаимодействии колёсных пар форвардера с твёрдыми препятствиями (пеньями, камнями) на трелёвочном волокне с учётом влажности почвогрунта. Модель базируется на законах сохранения энергии, контактной механике и критерии сдвигового разрушения грунта Кулона – Мора. Установлено, что динамическое давление на почвогрунт при наезде колеса на препятствие может в 2 и более раза превышать статическое давление. На основе натурных обследований трелёвочного волокна в сосняке-брусничнике выявлено, что глубина деформаций после твёрдых препятствий больше в сторону грузового хода форвардера, а образовавшаяся колея типа «гребенка» приводит к повышенному расходу топлива, росту динамических нагрузок и снижению комфорта оператора. Показано, что высота препятствия и влажность почвогрунта являются критическими факторами: при влажности выше предела пластичности суглинка ($W > 28-30\%$) и высоте препятствия $h \geq 0,3$ м для трёхосного форвардера относительная глубина колеи достигает $\lambda = 1,3$, что соответствует касанию днищем поверхности грунта и потере проходимости. Предложены и количественно обоснованы технические мероприятия по снижению глубины колеи: оснащение колёсных пар гибкими гусеничными лентами (моногоусеницами) и оптимизация нагрузки на оси. Для четырёхосного форвардера установка моногоусениц позволяет осуществлять трелёвку на влажных грунтах с препятствиями высотой до 0,4 м без снижения грузоподъёмности. Разработанный подход позволяет прогнозировать глубину колеи для заданных геотехнических условий и обоснованно применять меры по снижению динамических нагрузок с сохранением паспортной производительности машин.

Ключевые слова: форвардер, трелёвочный волок, динамическое давление, препятствие, влажность почвогрунта, математическое моделирование, проходимость

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-16-00047, <https://rscf.ru/project/26-16-00047/>.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи. Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства»

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Моделирование процесса образования колеи при последовательном взаимодействии колес форвардера с твердыми препятствиями на трелевочном волокне с учетом влажности почвогрунта / В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, Е. В. Сибиряткин, Е. А. Тихонов, П. Н. Перфильев // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 234–246. – Библиогр.: с. 243–245 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/15>.

Поступила 20.01.2026 Пересмотрена 23.03.2026 Принята 15.05.2026 Опубликовано онлайн 26.06.2026

Modeling the process of rut formation during sequential interaction of forwarder wheels with solid obstacles on a skid trail taking into account soil moisture

Vladimir Ya. Shapiro¹, shapiro54vlad@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

Igor V. Grigorev², silver73@inbox.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

Evgeny V. Sibiryatkin², jey-sib@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0007-0475-612X>

Evgeny A. Tikhonov⁴, tihonov@petrsu.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

Pavel N. Perfiliev⁵, savadf0706@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>

¹ St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, Institutsky Lane, 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

² Arctic State Agrotechnological University, Sergelyakhskoye Highway, 3 km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation

³ Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

⁴ Petrozavodsk State University, 33 Lenin Ave., Petrozavodsk, 185910, Russian Federation

⁵ Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

Abstract

A mathematical model of rut formation during sequential interaction of forwarder wheel sets with solid obstacles (stumps, stones) on a skidding trail is presented, taking into account soil moisture. The model is based on the laws of energy conservation, contact mechanics, and the Mohr–Coulomb shear failure criterion of soil. It has been established that the dynamic pressure on the soil when a wheel hits an obstacle can be 2 or more times higher than the static pressure. Based on field surveys of a skidding trail in a cowberry pine forest, it was revealed that the depth of deformations after solid obstacles is greater towards the loaded travel direction of the forwarder, and the resulting “comb” type rut leads to increased fuel consumption, increased dynamic loads, and reduced operator comfort. It is shown that obstacle height and soil moisture are critical factors: at moisture content above the plasticity limit of loam ($W > 28\text{--}30\%$) and obstacle height $h \geq 0.3$ m for a three-axle forwarder, the relative rut depth reaches $\lambda = 1.3$, which corresponds to the bottom contacting the ground surface and loss of trafficability. Technical measures to reduce rut depth are proposed and quantitatively substantiated: equipping wheel sets with flexible track belts (single-track wheels) and optimizing axle load. For a four-axle forwarder, the installation of single-track wheels allows skidding on wet soils with obstacles up to 0.4 m high without reducing load capacity. The developed approach makes it possible to predict rut depth for given geotechnical conditions and to reasonably apply measures to reduce dynamic loads while maintaining the rated productivity of the machines.

Keywords: forwarder, skidding trail, dynamic pressure, obstacle, soil moisture, mathematical modeling, trafficability

Funding: The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 26-16-00047, <https://rscf.ru/project/26-16-00047/>.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review. The work was carried out within the framework of the scientific school "Innovative developments in the field of logging industry and forestry".

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

For citation: Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Sibiryatkin E. V., Tikhonov E. A., Perfiliev P. N. (2026) Modeling the process of rut formation during sequential interaction of forwarder wheels with solid obstacles on a skid trail taking into account soil moisture. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 234–246 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/15>.

Received 20.01.2026.

Revised 23.03. 2026.

Accepted 15.05.2026.

Published online 26.06.2026

Введение

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности и экологической безопасности трелёвочных работ в условиях, когда эксплуатация форвардеров происходит на переувлажнённых почвогрунтах с

наличием твёрдых препятствий. Подход к анализу динамических режимов взаимодействия колеса с препятствием недавно был предложен в робототехнике. В частности, Zheng и др. [1] вводят параметр $S_c = H_{\max_o}/R$ – отношение максимальной преодолеваемой высоты препятствия к радиусу

колеса, а для оценки контактных усилий используют баланс потенциальной энергии при перепаде высоты. Авторы показывают, что пассивно-трансформируемые колёса позволяют достичь $S_c \approx 2,5$, тогда как обычные колёса ограничены $S_c \approx 1$. По аналогии в настоящей работе предлагается модифицированный критерий $\lambda = H / H_{\text{кл}}$ (отношение глубины колеи к клиренсу форвардера) и связать его с энергией ударного взаимодействия.

В настоящее время подавляющий объём заготовленной древесины в России вытревливается на погрузочные пункты форвардерами, практически 100 % которых имеют колёсный движитель [2]. На их производительность первоочередное влияние оказывают расстояние трелёвки и проходимость, зависящая от состояния поверхности движения. На территории лесного фонда РФ преобладают почвогрунты III и IV категории, которые в тёплый период года существенно теряют несущую способность из-за переувлажнения. Более того, процессы потепления климата привели к значительному сокращению периода устойчивой зимней вывозки, что вынуждает проводить трелёвку в сложных почвенно-грунтовых условиях [2].

Как отмечается в работе [3], реологические свойства грунтов (вязкость, ползучесть, релаксация) играют ключевую роль в формировании колеи при длительном и циклическом нагружении. Классические уравнения тягового баланса, принятые из теории автомобилей общего назначения, не учитывают сопротивление повороту, что приводит к погрешностям при оценке нагрузок на движитель, особенно при движении по переувлажнённым грунтам с твёрдыми включениями. При трелёвке пачки древесины трактор может до 70 % времени движения находиться в режиме поворота с разными радиусами кривизны [8]. Это создаёт дополнительные динамические воздействия при наезде на твёрдые препятствия, которые в существующих моделях колееобразования, как правило, не учитываются.

Полевые исследования Пискунова [4] показали, что состояние волока по его длине существенно варьируется: выделено 8 типов участков, включая участки с пнём в месте прохода колеса и участки, расположенные сразу за пнём. Автор приходит к выводу, что для описания взаимодействия движителя с почвогрунтом на всём протяжении волока необходим набор моделей [4]. Этот вывод непосредственно подтверждает актуальность нашей работы: наличие твёрдых препятствий (пней) и следующих за ними локальных деформаций («гребёнка») требует отхода от однородных моделей и учёта ударного и

последовательного характера нагружения при проходе нескольких колёсных пар форвардера.

Модернизация технологического оборудования лесных машин, включая харвестеры [5], позволяет повысить их эффективность, однако для форвардеров, движущихся по трелёвочным волокам, остаются нерешёнными вопросы прогнозирования колеи при наличии твёрдых включений. Значительная часть лесосечного фонда расположена на грунтах со слабой несущей способностью, что создаёт серьёзные проблемы при выполнении трелёвочных работ [6]. В таких условиях возникает глубокое колееобразование, буксование движителя и снижение производительности.

При движении лесных машин по неровной поверхности неизбежно возникают соударения элементов ходовой части с опорным основанием [7]. Наезд колеса на пень или камень создаёт ударное воздействие, которое может в 2 и более раза превышать статическое давление на почвогрунт. Степень уплотнения лесной почвы от воздействия движителей форвардера напрямую влияет как на расход топлива, так и на последующее лесовосстановление [8]. Особую опасность представляет многократное движение машины по одному и тому же следу, которое при наличии твёрдых включений приводит к глубокой необратимой колее, разрушающей почвенный профиль. Кроме того, в трансмиссии сочленённых машин возникает циркуляция мощности, достигающая 50–60 % от номинальной, что приводит к дополнительным энергозатратам и повышенному буксованию колёс [8].

Для оценки эффективности лесных машин в сложных условиях всё чаще применяются методы имитационного моделирования, позволяющие учесть такие факторы, как расстояние трелёвки и загрузка оборудования [9]. Однако существующие модели, как правило, не учитывают ударное воздействие колёс на твёрдые препятствия. При проведении выборочных рубок оставляемые деревья становятся существенным препятствием для движения лесозаготовительной техники: оператор харвестера вынужден совершать дополнительные манёвры, что увеличивает общий пробег машины и время цикла [10]. Аналогичная ситуация наблюдается при движении форвардера по волоку, где препятствиями служат пни и камни.

Международные исследования подтверждают значимость рассматриваемой проблемы. Bumber и др. [11] разработали модель движения форвардера на подъём, учитывающую перераспределение нагрузки между осями при преодолении препятствий. Zemánek и Neruda [12]

в полевых испытаниях показали, что максимальные фактические давления шины могут превышать расчётные статические на 203 %, что доказывает необходимость учёта динамической составляющей. Uusitalo и др. [13] установили, что влажность почвы и число проходов являются главными предикторами глубины колеи на мелкозернистых минеральных грунтах. Pandur и др. [14] экспериментально показали, что с каждым проходом форвардера глубина колеи возрастает нелинейно, и после 8–10 проходов на слабых грунтах машина практически теряет подвижность.

Современные методы машинного обучения открывают новые возможности для прогнозирования колееобразования [15], однако они требуют обширных обучающих выборок и не всегда учитывают физику ударного взаимодействия. Общие закономерности уплотнения почв при многократных проходах колёсных движителей подробно рассмотрены в обзоре Shaheb, Venkatesh и Shearer [16]. Комплексный анализ стратегий снижения ущерба почве от лесных машин представлен Labelle и др. [17], где отмечается, что для адекватного прогнозирования необходимы модели, учитывающие динамические пиковые нагрузки. Дымов и др. [18] на примере средней тайги Республики Коми показали, что даже после однократного прохода колёсной техники изменения свойств почвы сохраняются в течение длительного времени. Grube и др. [19] предложили использовать расстояние до пня в качестве предиктора деформации почвы, что напрямую подтверждает значимость учёта расположения пней при моделировании колеи.

Современные исследования в области лесного машиностроения всё чаще опираются на методы имитационного и математического моделирования, позволяющие учитывать большое количество природно-производственных факторов без проведения натурных экспериментов. В частности, разработаны модели, воспроизводящие работу харвестера с учётом случайного расположения деревьев и наличия препятствий, что позволяет оптимизировать траектории движения [20]. Однако для форвардеров, движущихся по трелёвочным волокам, аналогичные модели, учитывающие локальные препятствия в виде пней и камней, а также динамический характер нагружения при наезде на них, отсутствуют.

Цель работы – разработка математической модели образования колеи при последовательном взаимодействии колёсных пар форвардера с твёрдыми препятствиями на трелёвочном волокне с учётом влажности почвогрунта. Модель должна позволять количественно оценивать динамическую составляющую нагрузки, прогнозировать глубину

колеи после прохода каждой колёсной пары и обосновывать технические решения (применение колёсных моногусениц, оптимизацию нагрузки по осям) для сохранения производительности машин в сложных геотехнических условиях. В отличие от существующих статических моделей, в данной работе учитывается ударный характер нагружения при наезде на препятствие, а также последовательный (многопроходный) характер деформации почвогрунта. Разработанная модель может быть использована для обоснования допустимых нагрузок на оси форвардера при проектировании технологических карт разработки лесосек на переувлажнённых грунтах с наличием пней.

Материалы и методы

Натурное обследование

Натурное обследование трелевочного волокна проводилось в сосняке-брусничнике на лесосеке, разработанной по скандинавской технологии. Исследование показало, что глубины деформаций после твердых препятствий в колее больше в сторону грузового хода форвардеров (рисунок 4). Результаты натурного обследования поверхности колеи трелевочного волокна представлены на рисунке 1.

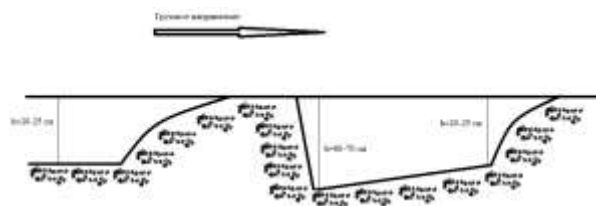


Рисунок 1. Результаты натурного обследования поверхности колеи трелевочного волокна в сосняке-брусничнике

Figure 1. Results of a full-scale survey of the track surface of a skidding portage in a cowberry pine forest
Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Также результаты натурного обследования колеи волокна показали, что после глубокой просадки движителя при сходе с твердого препятствия поверхность колеи плавно поднимается и выходит на уровень, характерный для нормального (безударного) деформирования поверхности.

Результатом образования колеи «гребенки» являются: повышенный расход топлива, связанный с необходимостью заезда на образовавшиеся случайным образом в колее препятствия; повышенные динамические нагрузки на раму и подвеску лесной машины; снижение комфорта работы оператора; обрывы корней, оставляемых на дораскивание деревьев при выборочных рубках.

Математическая модель

Пусть груженная колесная лесная машина (форвардер) общим весом Q воздействует на краевую часть массива почвогрунта, содержащую некоторое препятствие (пень, камень и т.п.) высотой h . Груз весом Q и массой M при падении с высоты h оказывает силовое воздействие F на почвогрунт, которое за единицу времени t формирует импульс массы $I_m = MV$, где V – динамическая скорость взаимодействия.

Из закона сохранения потенциальной и кинетической энергий определим скорость:

$$V = \sqrt{2gh},$$

где g – ускорение свободного падения.

Сила F , отнесенная к площади S пятна контакта шины с почвогрунтом, оказывает на него вертикальное динамическое давление p , равное:

$$p = \frac{Q\sqrt{2gh}}{S}, \quad (1)$$

которое приводит к образованию зоны разрушения краевой части массива почвогрунта и колеи в нем глубиной h_k .

Таким образом, динамическое давление p по сравнению с его статическим значением $p_c = Q/S$, наблюдаемым при отсутствии препятствий, возрастает пропорционально функциональному коэффициенту $\sqrt{2gh}$. Безразмерная величина p/p_c представляет собой коэффициент динамического усиления воздействия на краевую часть массива почвогрунта в пределах трелевочного волокна. Как показали расчеты, указанное усиление достигает 2-х кратных и более значений.

Исследование процесса образования колеи глубиной h_k представляет собой решение задачи контактного разрушения массива почвогрунта механизмом сдвига, подробно рассмотренной при использовании различных инденторов при статических и динамических нагрузках на массив сплошной среды [11–13].

Величина динамического давления сдвига q связана с вертикальным давлением p соотношением:

$$q = \gamma p = \frac{\nu}{1 - \nu} p, \quad (2)$$

где γ – коэффициент бокового расширения, ν – коэффициент Пуассона.

Центр O трехмерной системы координат $Oxyz$ поместим в центр пятна контакта взаимодействия индентора (шины лесной машины) с массивом почвогрунта и направим ось Oz вертикально вниз в направлении глубины колеи.

Величина давления сдвига q_z зависит от координаты z и снижается с ростом последней по степенному закону:

$$q_z = \frac{q}{(z/a)^n}, \quad a = \sqrt[3]{\frac{QR(1 - \nu^2)}{4E}}, \quad n = 1 - \frac{\gamma}{2}, \quad (3)$$

где a – радиус зоны контактного сближения круглого индентора радиусом R в пределах пятна контакта при его ударном взаимодействии с почвогрунтом, упругопластические свойства которого характеризуются модулем общей деформации E и коэффициентом Пуассона ν [11].

Максимальная глубина z , на которой выполняется критерий разрушения почвогрунта сдвигом, а именно $q_z \geq \tau$, где τ – величина предела прочности почвогрунта на сдвиг, принимается за глубину колеи h_k .

Величину τ , следуя положениям стандарта [14], определим с помощью соотношения:

$$\tau = C + p \tan \varphi, \quad (4)$$

в которое входят параметры паспорта прочности почвогрунта: C – величина его удельного сцепления и φ – угол внутреннего трения.

Установленные соотношения (1)–(4) позволяют определить величину h_k в виде:

$$h_k = a \left[\frac{\gamma p}{\tau} \right]^{1/n}. \quad (5)$$

В итоге с учетом исходной высоты h препятствия в результате ударного взаимодействия лесной машины с почвогрунтом образуется общая глубина колеи $H = h + h_k$, которую будем рассматривать как высоту следующего препятствия при взаимодействии с краевой частью массива очередной колесной пары.

Результаты

Произведем расчеты величины H для следующих геотехнических условий трелевки.

В качестве колесных лесных машин примем два форвардера:

1 - трехосный форвардер АМКООР 2662-01 с высотой клиренса $H_{кл}=580$ мм, радиусом передних колес $R=0,41$ м (диаметром 32 дюйма) и задних колес $R=0,33$ м (диаметром 26 дюйма). Максимальная нагрузка на переднюю ось составляет $Q_1=7$ т (общая максимальная нагрузка $Q=14$ т), нагрузка на вторую и третью оси $Q_2=Q_3=3,5$ т, длина пятна контакта $L=0,442$ м, его ширина $B=0,7$ м, $S=0,31$ м²;

2 - четырехосный форвардер АМКООР 2682-01 с клиренсом $H_{кл}=540$ мм и радиусом всех четырех пар колес $R=0,33$ м (диаметром 26 дюйма), максимальной нагрузке на все оси

$Q_1=Q_2=Q_3=Q_4=3,75$ т (общая максимальная нагрузка составляет $Q=15$ т), площадь пятна контакта равна $S=0,31$ м².

В качестве минеральной основы почвогрунта рассмотрим суглинок, влажность которого W , как установлено в работах [15-17], оказывает существенное влияние на его характеристики C , ϕ , E и ν .

В таблице 1 на основании данных [18-20] представлены показатели средних значений C , ϕ , E и ν для четырех состояний (категорий) почвогрунта по критерию его влажности W .

На рисунке 2 для условий эксплуатации трехосного форвардера на почвогрунтах III категории влажности представлен график (линия 1) зависимости абсолютных значений глубины колеи H , м, образованной в результате прохода всех колесных пар с нумерацией $N=1, 2, 3$ (ось абсцисс) при незначительном препятствии высотой $h=0,2$ м.

На этом же рисунке линия 2 отражает полученные значения H в безразмерном виде путем отнесения их к размеру клиренса $H_{кл}$, тем самым введен коэффициент $\lambda=H/H_{кл}$ и установлена его зависимость от номера оси N .

Как видим, даже при полной загрузке форвардера в этих геотехнических условиях трелевки параметр λ не достигает значения 1, т.е. препятствие не является критическим и образованная глубина колеи $H < H_{кл}$.

Однако по мере преодоления трехосным форвардером более крупных препятствий ситуация меняется в негативном направлении.

Так, на рисунке 3 для аналогичных выше геотехнических условий трелевки, представлены прогнозные зависимости $\lambda(N)$ для трех типов препятствий: $h=0,2$ м (линия 1), $h=0,3$ м (линия 2) и $h=0,4$ м (линия 3).

Таблица 1

Показатели физико-механических свойств почвогрунта

Table 1

Indicators of physical and mechanical properties of the soil

Категория / Category	W , %	Состояние почвогрунта / Soil condition	C , кПа / kPa	ϕ , °	E , кПа / kPa	ν
I	16	сухой / dry	20,3	24,7	3000	0,16
II	24	увлажненный / moist	15,1	21,4	1000	0,24
III	32	влажный / wet	10,9	17,5	700	0,32

IV	41	переувлажненный / waterlogged	6,5	13,3	400	0,41
----	----	-------------------------------	-----	------	-----	------

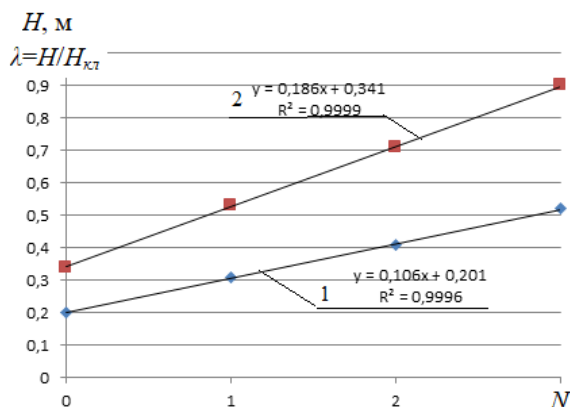


Рисунок 2. Увеличение глубины колеи по мере взаимодействия колесных пар форвардера с препятствием:

1 – H , м; 2 – $\lambda=H/H_{кл}$

Figure 2. Increasing track depth as the forwarder's wheelsets interact with an obstacle

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

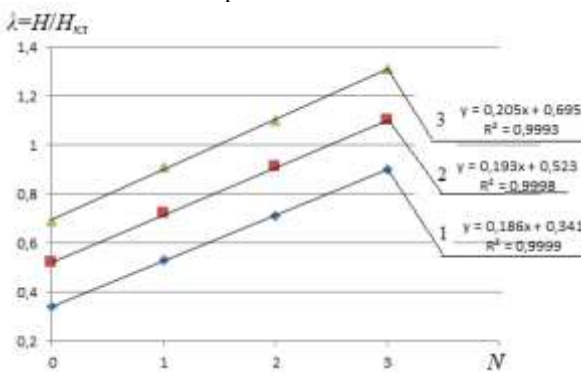


Рисунок 3. Влияние высоты препятствия на глубину образованной колеи:

1 - $h=0,2$ м; 2 - $h=0,3$ м; 3 - $h=0,4$ м

Figure 3. The effect of obstacle height on the depth of the formed track

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Полученные линейные зависимости наглядно показывают тенденции углубления колеи с ростом высоты препятствия по мере его преодоления всеми колесными парами трехосного форвардера.

Анализ данных рисунка 3 показывает, что уже при значении $h=0,3$ м (линия 2) данное препятствие является критическим для эффективного прохода форвардера с полной загрузкой.

Аналогичный вывод справедливо сделать и для более высокого препятствия с $h=0,4$ м, однако

проблемы его преодоления возникают уже после прохода первой колесной пары.

Таким образом, высота препятствия действительно является существенным фактором, влияющим на процесс трелевки и эффективного продвижения колесной лесной машины по заданной трассе.

Состояние влажности почвогрунта (таблица 1) во многом определяет его несущую способность и, следовательно, развитие процесса образования колеи.

На рисунке 4 на примере преодоления форвардером АМКОДОР 2662-01 препятствия высотой $h=0,3$ м видно, что зависимость λ от влажности W , %, с высокой степенью детерминации подчиняется возрастающему экспоненциальному закону.

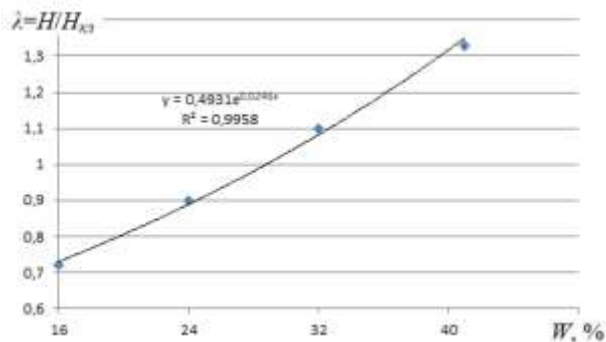


Рисунок 4. Влияние влажности почвогрунта на глубину колеи

Figure 4. Effect of soil moisture on track depth

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Отметим, что предел пластичности суглинка составляет примерно $W_n=28-30\%$, а предел текучести - $W_t=40-43\%$.

Из данных рисунка 7 следует, что при состоянии $W \leq W_n$ глубина колеи не превышает размера клиренса ($\lambda \leq 1$).

При трелевке в сложных условиях по влажным почвогрунтам с показателем $W > 30\%$ глубина колеи превышает размер клиренса.

Прогноз образования колеи при $W \rightarrow W_t$ является крайне неблагоприятным, поскольку величина λ достигает уровня 1,3, т.е. форвардер может погрузиться в переувлажненный почвогрунт на глубину, превышающую клиренс $H_{кл}$ на 30%.

Обратимся к рисунку 5 (линия 3), отражающему условия прохождения форвардером с полной загрузкой $Q=14$ т участка влажного почвогрунта со значительным препятствием высотой $h=0,4$ м.

Первая колесная пара при ударном взаимодействии с участком почвогрунта обусловила образование колеи глубиной до 90% от размера

клиренса. Дальнейшее движение форвардера будет затруднено, поскольку его днище достигнет поверхности почвогрунта.

Это обстоятельство требует реализации определенных технических мероприятий по снижению динамических ударных нагрузок на краевую часть массива почвогрунта в пределах трелевочного волокна.

Как показали расчеты (рисунок 5), оснащение второй и третьей колесных пар гибкими гусеничными лентами (моногоусеницами), позволяет практически в 2,5 раза увеличить длину и соответственно площадь пятна контакта.

Следствием этого является снижение уровня динамического давления на почвогрунт и параметра относительной глубины колеи λ от взаимодействия со второй колесной парой на 8% (линия 2) и с третьей парой на 27% по сравнению с исходной зависимостью λ от N при отсутствии гусениц.

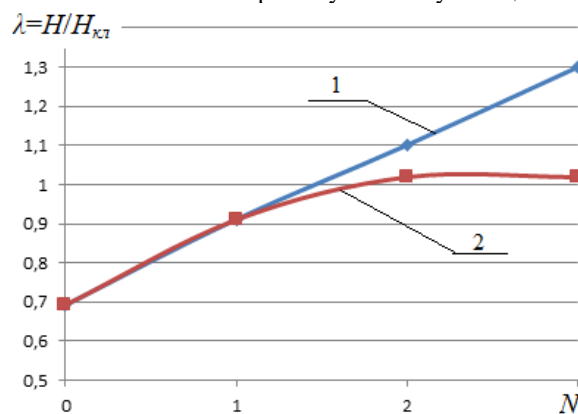


Рисунок 5. Изменение относительной глубины колеи при реализации мероприятий по снижению нагрузки на почвогрунт для трехосного форвардера
Figure 5. Changes in the relative depth of the track during the implementation of measures to reduce the load on the soil for a three-axis forwarder

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Однако при оснащении колесных пар четырехосного форвардера колесными моногоусеницами ситуация меняется на противоположную по сравнению с эксплуатацией трехосного форвардера. В этом случае удастся кардинально улучшить условия трелевки без снижения максимальной загрузки при достижении глубины колеи, обеспечивающей полный проход груженной лесной машины по почвогрунтам различной влажности, содержащим препятствия высотой до 0,4 м.

Обсуждение

Как видно из анализа данных рисунка 8 реализация данного технического решения

позволяет существенно улучшить условия трелевки с достижением показателя $\lambda \approx 1$ без снижения максимальной загрузки форвардера.

При этом дополнительное снижение веса с 14 до 10 т обеспечивает уменьшение относительной глубины колеи на 10% - с уровня $\lambda=1,02$ до $\lambda=0,93$, что позволяет сделать вывод о том, что преодоление данного препятствия форвардером не является критическим.

Таким образом, оснащение 2х и 3х колесных пар колесными моногусеницами в сочетании с определенным снижением общей загрузки форвардера совместно обеспечивают существенное снижение глубины образованной колеи (до 40%) от прогнозного максимального уровня значения индикативного параметра $\lambda=1,3$.

Еще одним эффективным техническим решением является использование достаточно широко распространенных на импортных лесных машинах, например, колесных лесных машинах компании Понссе, несбалансированных tandemных тележек [6]. Такое техническое решение, во-первых позволяет упростить данный узел, сделать надежнее, легче, и дешевле, во-вторых, узел такой конструкции повышает проходимость машины, за счет того, что при преодолении препятствия, первое колесо tandemа не давит на почвогрунт, до момента схода с препятствия заднего колеса tandemа. А это означает, что машина всегда имеет максимально возможную опорную площадь, и, соответственно, минимальное давление на почвогрунт. В рассматриваемой ситуации несбалансированная tandemная тележка (задняя у трехосного форвардера, передняя и задняя у четырехосного) ударит по дну колеи при сходе с твердого препятствия, но ударит сразу колесной парой. За счет чего площадь ударной нагрузки увеличится.

Несбалансированные tandemные тележки позволяют колесным лесным машинам «идти по верху» на слабонесущих почвогрунтах, не зарываясь в них. Но они хуже работают в условиях склонов.

Следует признать, что предложенные решения являются эффективными и наиболее предпочтительными при осуществлении трелевочных работ в данных геотехнических условиях, содержащих вдоль трассы движения значительные по высоте твердые препятствия.

Рассмотрим условия использования четырехосного форвардера АМКОДОР 2682-01 с клиренсом $H_{кл}=540$ мм при максимальной загрузке $Q=15$ т и ее равномерном распределении на все оси.

На рисунке 6 по аналогии с рисунком 8 исследовано влияние цикличности проходов осей N колесных пар (ось абсцисс) на параметр относительной глубины колеи λ (ось ординат) при

использовании обычных шин (линия 1) и колесных моногусениц (линия 2) на колесные пары 1-2 и 3-4 осей. Высота препятствия составляет $h=0,4$ м.

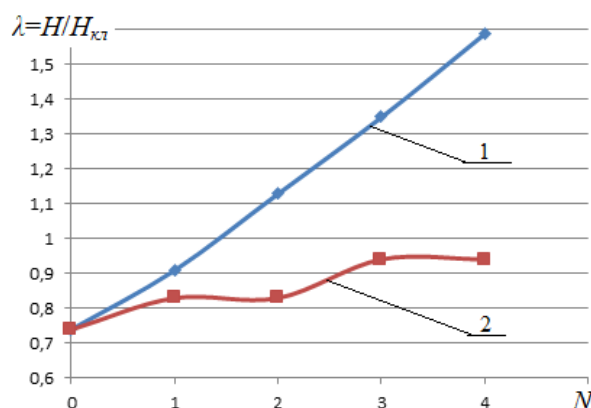


Рисунок 6. Изменение относительной глубины колеи при реализации мероприятий по снижению нагрузки на почвогрунт для четырехосного форвардера

Figure 6. Changes in the relative depth of the track during the implementation of measures to reduce the load on the soil for a four-axle forwarder

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Сравнительный анализ данных рисунков 8 и 9 позволяет сделать ряд выводов.

Во-первых, линии 1 на обоих рисунках практически идентичны. Отличие состоит в прогнозе глубины образованной колеи при полном проходе препятствия: для трехосного форвардера предельная величина $\lambda=1,3$, а для четырехосного - $\lambda=1,6$.

В обоих случаях данное препятствие следует признать критическим при полной загрузке обоих форвардеров.

Во-вторых, линии 2 на обоих рисунках свидетельствуют о том, что за счет оснащения колесных пар колесными моногусеницами четырехосный форвардер обеспечивает существенно лучшие конечные показатели процесса образования колеи без необходимости снижения общей загрузки, равной 15 т, тогда как при использовании трехосного форвардера с гусеницами, несмотря на больший клиренс, аналогичный результат достигался при снижении нагрузки с 14 до 10 т.

Исследуем для выбранных форвардеров при их полной загрузке совместное влияние параметров высоты препятствия h и влажности почвогрунта W на показатель относительной глубины колеи λ после прохода всех колесных пар через различные препятствия.

На рисунке 7 при эксплуатации трехосного форвардера с максимальной загрузкой представлена зависимость λ от h , м, и W , %.

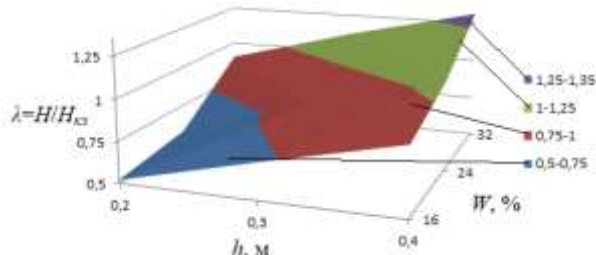


Рисунок 7. Зависимость относительной глубины колеи от высоты препятствия и влажности почвогрунта при эксплуатации трехосного форвардера

Figure 7. Dependence of the relative track depth on the height of the obstacle and soil moisture during operation of a three-axis forwarder

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Как видим, в 65-70% возможных значений исходных параметров (аргументов x и y), условия эксплуатации данного форвардера можно считать удовлетворительными, препятствия не являются критическими и снижения его максимальной загрузки и, следовательно, снижения производительности трелевки, не требуется.

По мере роста показателя влажности почвогрунта W до уровня своего предела пластичности ($W \geq 28\%$), а высоты препятствия – до уровней $h \geq 0,35$ м, необходимы вышерассмотренные мероприятия по снижению глубины образованной колеи.

Аналогичные исследования были выполнены для четырехосного форвардера (рисунок 8).

В отличие от условий эксплуатации трехосного форвардера, для четырехосного при использовании обычных шин, за счет большего количества осей и ударного взаимодействия с почвогрунтом, меньшего клиренса наблюдается ограниченная по размерам область (30-35%) сочетания исходных факторов влажности и высоты препятствий, при которых показатель $\lambda \leq 1$. При этом состояние влажности и характеристики почвогрунта соответствуют первым двум категориям (таблица 1). Трелевка по влажным и тем более переувлажненным почвогрунтам является критической.

Иными словами, эксплуатация четырехосного форвардера при наличии на его пути следования препятствий сопряжена с более сложным процессом их преодоления по сравнению с аналогичными условиями для трехосного форвардера.

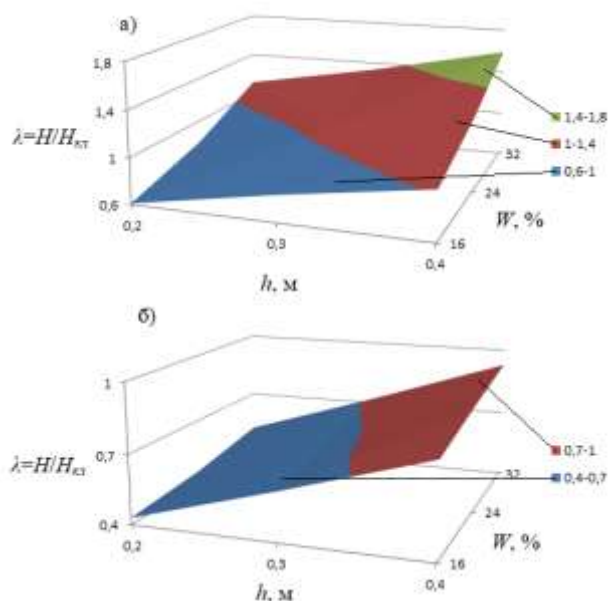


Рисунок 8. Зависимость относительной глубины колеи от высоты препятствия и влажности почвогрунта для четырехосного форвардера при использовании:

а) обычных шин; б) колесных моногусениц

Figure 8. The dependence of the relative track depth on the height of the obstacle and soil moisture for a four-axle forwarder when using: а) conventional tires; б) single-track wheels

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Однако, при оснащении колесных пар четырехосного форвардера колесными моногусеницами, ситуация меняется на противоположную по сравнению с эксплуатацией трехосного форвардера.

В этом случае удастся кардинально улучшить условия трелевки без снижения максимальной загрузки (рисунок 81 б) при достижении глубины колеи, обеспечивающей полный проход груженной лесной машины по почвогрунтам различной влажности, содержащим препятствия высотой до 0,4 м.

Закключение

В результате выполненных исследований разработана математическая модель взаимодействия колесной лесной машины (форвардера) с краевой частью массива почвогрунта, содержащей твердые препятствия в виде пней, камней и других включений. Модель базируется на законах сохранения энергии, контактной механике и критерии сдвигового разрушения грунта (Кулона – Мора). Установлено, что динамическое давление на почвогрунт при

наезде колеса на препятствие может в 2 и более раза превышать статическое давление, что обосновывает необходимость учёта ударного характера нагружения при прогнозировании глубины колеи.

На основе натурных обследований трелевочного волока в сосняке-брусничнике выявлено, что глубина деформаций после твердых препятствий больше в сторону грузового хода форвардера, а после глубокой просадки при сходе с препятствия поверхность колеи плавно поднимается до уровня нормального деформирования. Результатом образования колеи типа «гребенка» являются повышенный расход топлива, рост динамических нагрузок на раму и подвеску, снижение комфорта оператора и повреждение корневых систем оставляемых деревьев.

Показано, что высота препятствия и влажность почвогрунта являются критическими факторами, определяющими глубину колеи. При влажности, превышающей предел пластичности суглинка ($W > 28-30\%$), и высоте препятствия $h \geq 0,3$ м для трехосного форвардера с полной нагрузкой относительная глубина колеи достигает $\lambda = H/H_{\text{кл}} = 1,3$, что соответствует касанию днищем поверхности грунта и потере проходимости. Для четырехосного форвардера на стандартных шинах даже при $h = 0,3$ м и влажности $W > 24\%$ показатель $\lambda > 1$, что делает эксплуатацию невозможной без снижения нагрузки.

Предложены и количественно обоснованы технические мероприятия по снижению глубины колеи. Оснащение колесных пар гибкими гусеничными лентами (моногоусеницами) позволяет увеличить площадь пятна контакта в 2,5 раза и снизить относительную глубину колеи на 8–27% для

разных осей. Комбинация моногоусениц со снижением общей загрузки трехосного форвардера с 14 до 10 т обеспечивает уменьшение λ на 40% — с 1,3 до 0,93. Для четырехосного форвардера установка моногоусениц на все оси позволяет осуществлять трелевку на влажных грунтах с препятствиями высотой до 0,4 м без снижения грузоподъемности.

Установлено, что при эксплуатации трехосного форвардера в 65–70% сочетаний исходных параметров (влажности и высоты препятствий) условия можно считать удовлетворительными, и снижения производительности не требуется. Для четырехосного форвардера область допустимых сочетаний составляет лишь 30–35%, что указывает на его более высокую чувствительность к наличию препятствий.

Разработанный подход и полученные зависимости позволяют на стадии проектирования трелевочных волоков и выбора типа форвардера прогнозировать глубину колеи для заданных геотехнических условий (влажность, высота препятствий) и обоснованно применять меры по снижению динамических нагрузок, сохраняя паспортную производительность машин.

Перспективы дальнейших исследований включают учёт многократных проходов по одному следу (циклическое накопление деформаций); влияние скорости движения форвардера на динамическое давление; разработку инженерной методики назначения предельно допустимой высоты пней для разных типов почв; экспериментальную верификацию модели в натуральных условиях.

Список литературы

1. Zheng C., Sane S., Lee K., Kalyanram V., Lee K. α -WaLTR: Adaptive Wheel-and-Leg Transformable Robot for Versatile Multiterrain Locomotion. IEEE Transactions on Robotics. 2023; 39 (2): 941-958. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TRO.2022.3226114>.
2. Бурмистрова О.Н., Просужих А.А., Хитров Е.Г., Куницкая О.А., Лунева Е.Н. Теоретические исследования производительности форвардеров при ограничениях воздействия на почвогрунты // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2021. – № 3(381). – С. 101-116. – DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-3-101-116>.
3. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа. 1978. – 447 с.
4. Пискунов М.А. Дополнение к типизации исходных условий для исследования процессов взаимодействия движителя форвардера с почвогрунтом // Хвойные бореальной зоны. – 2021. – Т. 39. – № 4. – С. 307-312.
5. Рукомойников К.П., Царев Е.М., Анисимов С.Е., Татаринцов Д.С., Купцова В.О., Гилязова Т.А. Модернизация валочно-сучкорезно-раскряжевочного механизма лесного харвестера // Известия вузов. Лесной журнал. – 2022. – № 3. – С. 130-138. – DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-130-138>.
6. Исаченков В.С., Симанович В.А. К вопросу влияния природно-климатических условий на производительность колесных трелевочных машин // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2020. – № 2(234). – С. 205-209.
7. Авдеева Е.В., Полетайкин В.Ф., Калинин М.Д. Моделирование работы лесной машины // Хвойные бореальной зоны. – 2021. – Т. 39. – № 1. – С. 51-54.

8. Гудков В.В., Сокол П.А., Божко А.В., Новикова Т.П., Ребко С.В. Двухосные сочленённые лесотранспортные машины в условиях лесосеки: оценка применимости // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12. – № 4 (48). – С. 77-95. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/6>.
9. Karpachev S., Bykovskiy M. Digital simulation of forest multioperation machine operation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020; 507: 012008. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/507/1/012008>.
10. Rukomojnikov K.P., Sergeeva T.V., Aleksagina N.N. Simulation Modeling of Labor Costs for Moving of Harvester between Working Positions in Cutting Area. Technical Journal. 2026; 20 (1): 66-72. – DOI: <https://doi.org/10.31803/tg-20241005213728>.
11. Bumber Z., Đuka A., Pandur Z., Poršinsky T. Gradeability of a Forwarder Based on Traction Performance. Forests. 2023; 14 (1): 103. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14010103>.
12. Zemánek T., Neruda J. Impact on the Operation of a Forwarder with the Wheeled, Tracked-Wheel or Tracked Chassis on the Soil Surface. Forests. 2021; 12 (3): 336. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f12030336>.
13. Uusitalo J., Ala-Ilomäki J., Lindeman H., Toivio J., Siren M. Predicting rut depth induced by an 8-wheeled forwarder in fine-grained boreal forest soils. Annals of Forest Science. 2020; 77 (2): 42. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00948-y>.
14. Pandur Z., Kopseak H., Šušnjar M., Landekić M., Šporčić M., Bačić M. Effect of forwarder multipassing on forest soil parameters changes. iForest – Biogeosciences and Forestry. 2022; 15 (6): 476-483. – DOI: <https://doi.org/10.3832/for4138-015>.
15. Golanbari B., Mardani A., Farhadi N. et al. Applications of machine learning in predicting rut depth in off-road environments. Scientific Reports. 2025; 15: 5486. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90054-8>.
16. Shaheb M.R., Venkatesh R., Shearer S.A. A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production. Journal of Biosystems Engineering. 2021; 46: 417-439. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7>.
17. Labelle E.R., Hansson L., Högbom L. et al. Strategies to Mitigate the Effects of Soil Physical Disturbances Caused by Forest Machinery: a Comprehensive Review. Current Forestry Reports. 2022; 8: 20-37. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00155-6>.
18. Dymov A.A., Startsev V.V., Gorbach N.M. et al. Changes in Soil and Vegetation with Different Number of Passes of Wheeled Forestry Equipment (Middle Taiga, Komi Republic). Eurasian Soil Science. 2022; 55: 1633-1646. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229322110023>.
19. Grube G., Grigolato S., Ala-Ilomäki J., Routa J., Lindeman H., Astrup R., Talbot B. Modelling machine-induced soil deformation in forest soils using stump proximity and machine learning. Biosystems Engineering. 2025; 258: 104255. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2025.104255>.
20. Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Царев Е.М., Анисимов П.Н. Имитационное моделирование технологического процесса заготовки древесины на примере лесного харвестера // Лесной вестник / Forestry Bulletin. – 2023. – Т. 27. – № 3. – С. 69-80. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-3-69-80>.

References

1. Zheng C., Sane S., Lee K., Kalyanram V., Lee K. α -WaLTR: Adaptive Wheel-and-Leg Transformable Robot for Versatile Multiterrain Locomotion. *IEEE Transactions on Robotics*. 2023; 39 (2): 941-958. DOI: <https://doi.org/10.1109/TRO.2022.3226114>.
2. Burmistrova O.N., Prosuzhikh A.A., Khitrov E.G., Kunitskaya O.A., Luneva E.N. Teoreticheskie issledovaniya proizvoditelnosti forvarderov pri ogranicheniyah vozdeystviya na pochvogrunt. [Theoretical Studies of Forwarder Productivity with Limited Impact on Soils]. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*. 2021;3: 101-116. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-3-101-116>.
3. Vyalov S.S. Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov. [Rheological foundations of soil mechanics]. Moscow: Vysshaya shkola; 1978. 447 p. (In Russ.).
4. Piskunov M.A. Dopolnenie k tipizacii iskhodnykh usloviy dlya issledovaniya processov vzaimodeystviya dvizhitelya forvardera s pochvogruntom. [Addition to the classification of initial conditions for the modelling of the processes of interaction of forwarder wheels with soil]. *Hvoynye borealnoy zony = Conifers of the boreal area*. 2021;39(4): 307-312. (In Russ.).
5. Rukomojnikov K.P., Tsarev E.M., Anisimov S.E., Tatarinov D.S., Kuptcova V.O., Gilyazova T.A. Modernizaciya valочно-suchkorezno-raskryzhevochnogo mehanizma lesnogo harvester. [Upgrading the Feller-Delimer-Crosscutter Mechanism of a Forest Harvester]. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*. 2022;3: 130-138. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-130-138>.
6. Isachenkov V.S., Simanovich V.A. K voprosu vliyaniya prirodno-klimaticheskikh usloviy na proizvoditelnost kolesnykh trelevochnykh mashin. [To the question of the influence of natural-climatic conditions on the productivity

- of wheeled skidders]. *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe hozyaystvo, prirodopolzovanie i pererabotka vozobnovlyаемых ресурсов = Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, Nature Management and Processing of Renewable Resources.* 2020;2(234): 205-209. (In Russ.).
7. Avdeeva E.V., Poletaykin V.F., Kalinin M.D. Modelirovanie raboty lesnoy mashiny. [Simulation of forestry machine operation]. *Hvoynye borealnoy zony = Conifers of the boreal area*. 2021;39(1): 51-54. (In Russ.).
 8. Gudkov V.V., Sokol P.A., Bozhko A.V., Novikova T.P., Rebko S.V. Dvuhosnyye sochlenyonnyye lesotransportnyye mashiny v usloviyakh leseki: ocenka primenimosti. [Biaxial articulated timber vehicles in the conditions of a cutting: assessment of applicability]. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*. 2022;12(4): 77-95. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/6>.
 9. Karpachev S., Bykovskiy M. Digital simulation of forest multioperation machine operation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;507: 012008. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/507/1/012008>.
 10. Rukomojnikov K.P., Sergeeva T.V., Aleksagina N.N. Simulation Modeling of Labor Costs for Moving of Harvester between Working Positions in Cutting Area. *Technical Journal*. 2026;20(1): 66-72. DOI: <https://doi.org/10.31803/tg-20241005213728>.
 11. Bumber Z., Đuka A., Pandur Z., Poršinsky T. Gradeability of a Forwarder Based on Traction Performance. *Forests*. 2023;14(1): 103. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14010103>.
 12. Zemánek T., Neruda J. Impact on the Operation of a Forwarder with the Wheeled, Tracked-Wheel or Tracked Chassis on the Soil Surface. *Forests*. 2021;12(3): 336. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12030336>.
 13. Uusitalo J., Ala-Ilomäki J., Lindeman H., Toivio J., Siren M. Predicting rut depth induced by an 8-wheeled forwarder in fine-grained boreal forest soils. *Annals of Forest Science*. 2020;77(2): 42. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00948-y>.
 14. Pandur Z., Kopssek H., Šušnjar M., Landekić M., Šporčić M., Bačić M. Effect of forwarder multipassing on forest soil parameters changes. *iForest – Biogeosciences and Forestry*. 2022;15(6): 476-483. DOI: <https://doi.org/10.3832/for4138-015>.
 15. Golanbari B., Mardani A., Farhadi N., et al. Applications of machine learning in predicting rut depth in off-road environments. *Scientific Reports*. 2025;15: 5486. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90054-8>.
 16. Shaheb M.R., Venkatesh R., Shearer S.A. A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production. *Journal of Biosystems Engineering*. 2021;46: 417-439. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7>.
 17. Labelle E.R., Hansson L., Högbom L., et al. Strategies to Mitigate the Effects of Soil Physical Disturbances Caused by Forest Machinery: a Comprehensive Review. *Current Forestry Reports*. 2022;8: 20-37. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00155-6>.
 18. Dymov A.A., Startsev V.V., Gorbach N.M., et al. Changes in Soil and Vegetation with Different Number of Passes of Wheeled Forestry Equipment (Middle Taiga, Komi Republic). *Eurasian Soil Science*. 2022;55: 1633-1646. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229322110023>.
 19. Grube G., Grigolato S., Ala-Ilomäki J., Routa J., Lindeman H., Astrup R., Talbot B. Modelling machine-induced soil deformation in forest soils using stump proximity and machine learning. *Biosystems Engineering*. 2025;258: 104255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2025.104255>.
 20. Rukomojnikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Tsarev E.M., Anisimov P.N. Imitacionnoe modelirovanie tehnologicheskogo processa zagotovki drevesiny na primere lesnogo harvester. [Modeling operation of forest harvester in AnyLogic simulation system]. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*. 2023;27(3): 69-80. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-3-69-80>.

Сведения об авторах

Шapiro Владимир Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры Высшей математики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский переулок., д. 13, г. Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, e-mail: shapiro54vlad@mail.ru.

Григорьев Игорь Владиславович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3, г. Якутск, 677007, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, e-mail: silver73@inbox.ru.

✉ *Сибиряткин Евгений Викторович* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0475-612X>, e-mail: jei-sib@mail.ru.

Технологии. Машины и оборудование

Тихонов Евгений Андреевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры транспортных и технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, e-mail: tihonov@petrsu.ru.

Перфильев Павел Николаевич – кандидат технических наук, зав. кафедрой лесопромышленных производств и обработки материалов ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, д 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>, e-mail: p.perfilev@narfu.ru.

Information about the authors

Vladimir Ya. Shapiro – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Higher Mathematics, St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, Institutsky Lane, 5, St. Petersburg, 194021, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, e-mail: shapiro54vlad@mail.ru.

Igor V. Grigorev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology and Equipment of the Forest Complex of the Arctic State Agrotechnological University, Sergelyakhskoye Highway, 3 km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, e-mail: silver73@inbox.ru.

✉ *Evgeniy V. Sibiryatkin* – Postgraduate Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0475-612X>, e-mail: jey-sib@mail.ru.

Evgeny A. Tikhonov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Transport and Technological Machinery and Equipment, Petrozavodsk State University, 33 Lenin Ave., Petrozavodsk, 185910, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, e-mail: tihonov@petrsu.ru.

Pavel N. Perfilev – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Timber Industry and Materials Processing of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>, e-mail: p.perfilev@narfu.ru.

✉ – Для контактов / Corresponding author