




Обоснование параметров и разработка конструкций навесных трелёвочных тележек для тракторов общего назначения

Владимир В. Сиваков¹, sv@bgtu.ru,  0000-0002-0175-9030

Анатолий Н. Заикин¹, zaikin.anatolij@yandex.ru,  0000-0002-1831-6893

Владимир А. Зеликов² , zelikov-vrn@mail.ru, 0000-0003-2317-9413

¹ ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», пр. Станке Димитрова, 3, г. Брянск, 241037, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

Повышение производительности труда при комплексной механизации лесозаготовок сдерживается экологическим ущербом от перемещения тяжелой техники: удельное давление на почву достигает 0,08–0,12 МПа, глубина колеи – 20–30 см, повреждение корневой системы оставляемых деревьев – до 60–70%. Снижение вредного воздействия возможно за счёт использования тракторов общего назначения с навесными приспособлениями. На основании анализа существующих устройств (трелёвочных лебёдок ЛТН 50, клещевых захватов ЗТ 140 М, УТУ 2 «ПАУК М», грейферов HRZ и Uniforest) установлено, что наиболее эффективным является навесная трелёвочная тележка с захватом, работающая в полуподвешенном режиме. Авторами предложены два патентованных варианта конструкции [24]. Основные параметры: грузоподъёмность до 5 т (объём пачки до 6 плотных м³), масса тележки 380 кг, усилие зажима клещевин не менее 35 кН, рабочее давление в гидросистеме 16–20 МПа, время цикла захват/сброс 5–8 с. Агрегатирование с трактором (например, МТЗ-320) – через трёхточечную навеску категории 2 (ГОСТ 3480–76). При рабочем ходе тележка перекачивается по грунту на пневмоколёсах 6,50–10, что разгружает заднюю ось трактора на 35–40%, снижает тяговое сопротивление на 25–30% и удельное давление на почву до 0,02–0,03 МПа (в 3–4 раза меньше, чем при чокерной трелёвке), глубину колеи – до 5–8 см. При холостом ходе тележка поднимается на клиренс не менее 400 мм, повышая манёвренность трактора (радиус поворота сокращается на 20–25%) и снижая износ ходовой части. Тяговый расчёт для трактора МТЗ-320 (мощность 26,48 кВт, $\eta=0,85$) показал касательную силу тяги 16,55 кН, допустимый вес пачки 30,8 кН, объём пачки 2,8–3,9 м³ в зависимости от длины сортимента (4,5 м). Сменная производительность при расстоянии трелёвки 100 м и объёме хлыста 0,38 м³ составляет 97,7–104,8 м³/смену в зависимости от скоростного режима (холостой ход 1,81–2,49 м/с, гружёный 1,02–1,36 м/с). Разработанные 3D-модели и кинематические схемы подтверждают адаптацию тележки к неровностям рельефа (угловые перемещения до $\pm 15^\circ$) и высокую ремонтпригодность в полевых условиях.

Ключевые слова: лесозаготовки, трелёвка, трелёвочные приспособления, трелёвочная тележка, моделирование, экологичность лесопользования

Финансирование: Исследование выполнено без привлечения дополнительного финансирования

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

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Сиваков, В. В. Обоснование параметров и разработка конструкций навесных трелёвочных тележек для тракторов общего назначения / В. В. Сиваков, А. Н. Заикин, В. А. Зеликов // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 217–233. – Библиогр.: с. 230–233 (24 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/14>.

Поступила 25.01.2026. *Пересмотрена* 20.02.2026. *Принята* 20.05.2026. *Опубликована онлайн* 26.06.2026

Justification of parameters and development of designs for mounted skidding carts for general-purpose tractors

Vladimir V. Sivakov¹, sv@bgtu.ru, ©0000-0002-0175-9030

Anatolii N. Zaikin¹, zaikin.anatolij@yandex.ru, ©0000-0002-1831-6893

Vladimir A. Zelikov² ✉, zelikov-vrn@mail.ru, 0000-0003-2317-9413

¹ Bryansk State University of Engineering and Technology, Stanke Dimitrova Ave., 3, Bryansk, 241037, Russian Federation

² Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

Abstract

Increasing labour productivity in mechanised logging is constrained by environmental damage from heavy machinery: specific ground pressure reaches 0.08–0.12 MPa, rut depth – 20–30 cm, root system damage to remaining trees – up to 60–70%. Reducing the negative impact is possible by using general-purpose tractors with mounted attachments. Based on the analysis of existing devices (LTN 50 skidding winches, ZT 140 M grapple grabs, UTU 2 “PAUK M”, HRZ and Uniforest grapples), it was found that the most effective is a mounted skidding trolley with a grapple operating in semi-suspended mode. The authors propose two patented design variants [24]. Key parameters: load capacity up to 5 t (bunch volume up to 6 solid m³), trolley weight 380 kg, clamping force of jaws at least 35 kN, hydraulic system working pressure 16–20 MPa, grab/release cycle time 5–8 s. Attachment to a tractor (e.g., MTZ-320) is via a category 2 three-point hitch (GOST 3480–76). During the working stroke, the trolley rolls on 6.50–10 pneumatic tyres, relieving the tractor’s rear axle by 35–40%, reducing traction resistance by 25–30% and specific ground pressure to 0.02–0.03 MPa (3–4 times lower than with choker skidding), and rut depth to 5–8 cm. During idle travel, the trolley is raised to a clearance of at least 400 mm, increasing tractor manoeuvrability (turning radius reduced by 20–25%) and reducing chassis wear. Traction calculation for the MTZ-320 tractor (power 26.48 kW, $\eta=0.85$) showed a tangential traction force of 16.55 kN, permissible bunch weight of 30.8 kN, bunch volume of 2.8–3.9 m³ depending on log length (4.5 m). Shift productivity at a skidding distance of 100 m and a log volume of 0.38 m³ is 97.7–104.8 m³/shift depending on the speed mode (idle speed 1.81–2.49 m/s, loaded speed 1.02–1.36 m/s). The developed 3D models and kinematic schemes confirm the trolley’s adaptation to terrain irregularities (angular movements up to $\pm 15^\circ$) and high maintainability in field conditions.

Keywords: logging, skidding, skidding attachments, skidding trolley, modeling, environmental sustainability of forest management

Funding: The work was carried out without additional funding.

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

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

For citation: Sivakov V. V., Zaikin A. N., Zelikov V. A. (2026) Justification of parameters and development of designs for mounted skidding carts for general-purpose tractors. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 217–233 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/14>.

Received 25.01.2026. **Revised** 20.02.2026. **Accepted** 15.05.2026. **Published online** 26.06.2026

Введение

Повышение производительности труда на основе комплексной механизации и автоматизации производственных процессов является одной из важнейших задач лесной промышленности. Однако применение тяжелой техники зачастую приводит к серьезным экологическим последствиям. Перемещение лесовозных машин по естественному грунту наносит ущерб почве и оставшимся деревьям, размер которого зависит от вида, сопротивления и

состояния почвы, от массы и частоты движения машин, а также от длины бревен [1–3]. Для снижения вредного воздействия лесозаготовительной техники на почву предлагается учитывать рельеф местности, подбирать модификации машин и эффективно осуществлять планирование лесозаготовок [4–7].

На лесозаготовительных предприятиях наблюдается устойчивая тенденция к внедрению постепенных (выборочных) рубок леса [8, 9]. Однако номенклатура машин, специализированных для выборочных рубок,

выпускаемых как зарубежными, так и отечественными производителями, остаётся ограниченной. Применение технологического оборудования с клещевым захватом делает возможной трелёвку как сформированных валочно-пакетирующими машинами пачек деревьев, так и одиночных деревьев (хлыстов), а также составленных из них пачек. Основным преимуществом трелёвки пачками является то, что захват и транспортировка всей пачки происходят за один цикл, что заметно сокращает временные затраты на погрузочно-разгрузочные работы, увеличивает долю транспортной составляющей в работе трелёвочного трактора и, как следствие, повышает его производительность [10, 11]. Вместе с тем указанный способ предъявляет повышенные требования к пачке: она должна быть компактно сформирована, располагаться в удобном для подъезда трактора месте и обеспечивать полную загрузку агрегата [3]. Недостатком метода выступает необходимость использования дорогостоящих валочно-пакетирующих машин. Вследствие этого валку преимущественно выполняют бензопилами, что существенно затрудняет сбор трелюемой пачки [6].

Кроме того, в настоящее время [27] по различным причинам производство специальных лесозаготовительных машин для сплошных рубок леса практически прекращено, а для рубок ухода такая техника никогда не выпускалась. В связи с этим для выполнения лесозаготовительных работ предлагаются разнообразные варианты использования тракторов общего назначения, оснащаемых специальными навесными приспособлениями [12, 13].

При выборе лесозаготовительной техники (харвестеров, форвардеров, погрузчиков, сортиментовозов) необходимо учитывать не только их технические характеристики, но и возможность интеграции в единое цифровое пространство, позволяющее осуществлять оперативное планирование работы машинных комплексов [14–16], контроль технического состояния машин и управление их техническим обслуживанием и ремонтом посредством телекоммуникационных технологий [17–19].

Цель работы

Разработка навесного трелёвочного приспособления для бесчokerной трелёвки сортиментов или маломерных деревьев (хлыстов) на базе трактора общего назначения, (малогабаритного трактора типа МТЗ-320).

Материалы и методы

Объектом исследования являлись навесные трелёвочные приспособления, агрегируемые с тракторами общего назначения, а также разработанные авторами конструкции трелёвочных тележек на основе патентного решения [24]. Предметом исследования выступали

кинематические, геометрические и тягово-энергетические параметры указанных устройств.

Теоретическую базу исследования составили труды отечественных и зарубежных учёных в области механизации лесозаготовок и экологии лесопользования, а также нормативно-техническая документация, включая ГОСТ 3480–76 на трёхточечную навеску. Сбор первичной информации осуществлялся методом систематического поиска по базам данных eLibrary.ru, ResearchGate.net и открытым интернет-ресурсам с формированием запроса «трелёвочные приспособления к лесозаготовительной технике» и его англоязычных аналогов. Дополнительно применялся метод патентного поиска, в рамках которого проанализирована отечественная и зарубежная патентная документация, включая патент [25]. Обработка полученных данных выполнялась методами контент-анализа и сравнительной оценки конструктивных решений, что позволило систематизировать существующие трелёвочные устройства (лебёдки, клещевые захваты, трелёвочные тележки) и выявить их преимущества и недостатки. На основе проведённого анализа разработана авторская классификация методов трелёвки (рисунок 1) и видов трелёвочных приспособлений для бесчokerной трелёвки (рисунок 4).

Геометрическое и параметрическое 3D-моделирование разработанной патентной конструкции трелёвочной тележки выполнялось в среде твердотельного моделирования. На основе построенных трёхмерных моделей (рисунки 11 и 12, б) проведён кинематический анализ механизма подъёма стрелы и захвата, определены зоны рабочих перемещений, углы поворота ротатора (360°), траектории движения клещевин и их предельные положения. Исследованы угловые перемещения стрелы (до $\pm 15^\circ$ относительно горизонтали) и синхронизация работы гидроцилиндров.

Тяговый расчёт агрегата, включающего трактор МТЗ-320 с навесной тележкой, выполнен аналитическим методом на основе уравнения равномерного движения с учётом коэффициентов сопротивления, веса трактора, веса пачки, уклона местности и сцепных качеств движителя. Расчётные зависимости позволили определить касательную силу тяги (16,55 кН), оптимальный вес трелюемой пачки (30,84 кН), объём пачки (2,8–3,9 м³), а также выполнить проверку по сцеплению. Дополнительно проведён расчёт сменной производительности по общепринятой методике с учётом продолжительности смены (28800 с), времени на подготовительно-заключительные работы (3000 с) и коэффициента использования рабочего времени (0,85). Производительность определена для различных расстояний трелёвки

Технологии. Машины и оборудование

(от 100 до 300 м) и объёмов хлыста (от 0,24 до 0,38 м³) при двухскоростных режимах (холостой ход 1,81 и 2,49 м/с, гружёный ход 1,02 и 1,36 м/с).

Результаты

Трелёвка древесины относится к числу технологически сложных и потенциально опасных лесозаготовительных операций. Для повышения безопасности и эффективности этого процесса разработаны различные средства механизированной трелёвки, которые могут быть реализованы как на гужевой тяге, так и с использованием механических энергетических средств (рисунок 1).

В качестве тяговых агрегатов применяются тракторы общего назначения, специализированные трелёвочные тракторы, гужевой транспорт, а также малогабаритные средства механизации – мини-тракторы [20, 21], квадроциклы и другие мотоприспособления. Наиболее простым (примитивным) способом конной трелёвки является перемещение бревна с помощью цепи или клещей (рисунок 2). При таком способе бревно полностью волочится по грунту или снежному покрову. Вследствие шероховатости поверхности бревна (наличия

коры, сучков, неровностей) возникает значительное сопротивление движению. Коэффициент сопротивления (удельное тяговое сопротивление) на горизонтальном участке варьируется в зависимости от сезона и состояния волока: в летний период при отсутствии подготовленного волока он составляет 0,75 и выше, при движении по ровному волоку – 0,58; зимой при движении по ровному волоку – 0,32. Менее энергозатратным вариантом является трелёвка бревна на тележке (рисунок 2, б), позволяющая частично разгрузить комлевую часть и снизить сопротивление перекатыванию.

На лесозаготовках трелёвочные лебёдки (рисунок 3) используются для транспортировки поваленных деревьев, хлыстов, сортиментов и являются эффективными как при выборочных рубках, так и при преодолении труднодоступных участков лесной местности [22, 23]. В настоящее время предлагается достаточно большое количество лебёдок как отечественного, так и зарубежного производства.

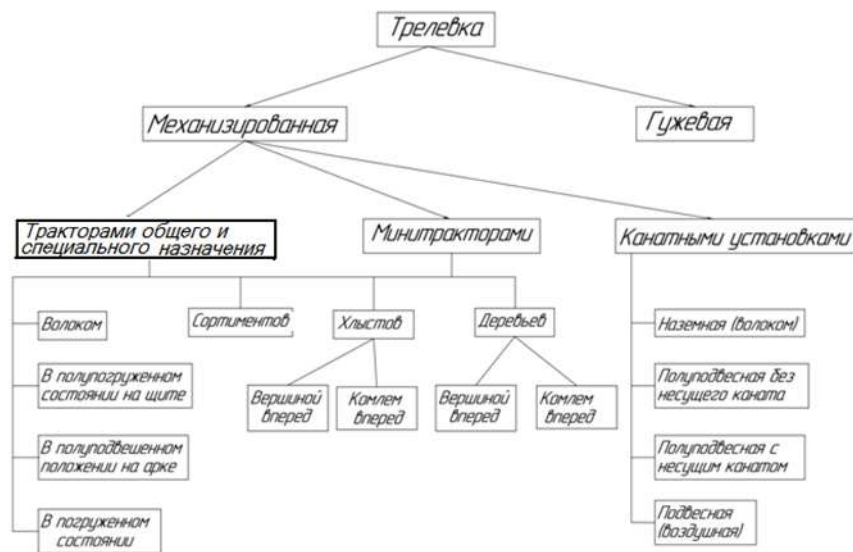


Рисунок 1 / Figure 1. Классификация методов трелёвки / Classification of skidding methods

Источник: собственная схема авторов / Source: authors' own scheme



Рисунок 2 Схема трелёвки лошадей
Horse skidding scheme

Источник: <https://pxhere.com/de/photo/785550>, <https://ru.pinterest.com/pin/944348615584140618/>



Рисунок 3 / Трелёвочная лебёдка ЛТН-50 /
Figure 3. Skidding winch LTN-50

Источник: <https://clck.ru/3NWmRD>

Среди различных технических средств механизации при рубках ухода широко применяются устройства для бесчокерной трелёвки леса – навесные гидрофицированные захватные механизмы (грейферного или челюстного типа), монтируемые на заднюю трёхточечную навеску трактора. Грузоподъёмность таких устройств составляет от 1,5 до 5 тонн (объём пачки – до 6 плотных м³), масса собственно захватного оборудования не превышает 350–400 кг. Рабочее давление в гидросистеме – 16–20 МПа, усилие зажима на клещевинах – не менее 25–35 кН. Время полного цикла захват/сброс – 5–8 секунд. Ротатор (при наличии) обеспечивает поворот захвата в горизонтальной плоскости на угол до 360°, что позволяет ориентировать комли пачки при штабелировании.

Помимо трелёвки из лесонасаждений отдельных деревьев (диаметром до 30 см) и небольших пачек (2–5 брёвен) при проведении рубок ухода, такие трелёвочные приспособления

успешно используются для штабелирования, выравнивания торцов и окучивания трелёванной древесины, а также для очистки вырубков от порубочных остатков (возможен захват пучков сучьев и веток длиной до 3 м). Скорость трелёвки с грузом – до 5–7 км/ч на волоках, на холостом ходу – до 10–12 км/ч. Радиус маневра при поднятом захвате (клиренс под захватом не менее 500 мм) уменьшается на 20–30% по сравнению с чокерной трелёвкой, что критично в стеснённых условиях лесосеки.

Как правило, эти устройства являются навесными или съёмными (время монтажа/демонтажа – не более 15–20 минут) и агрегируются с широко распространёнными в лесном хозяйстве колёсными тракторами тяговых классов 0,6...1,4 кН (МТЗ-80/82, ЛТЗ-55, Беларус-320). Применение бесчокерной трелёвки позволяет снизить удельное давление на почву до 0,02–0,03 МПа (в 3–4 раза ниже, чем при волочении пачки чокером), сократить глубину колеи с 20–30 см до 5–8 см и уменьшить

повреждение корневой системы оставляемых деревьев на 60–70%.



Классификация средств механизации трелёвки представлена на рисунке 4 / Figure 4.

Рисунок 4 / Figure 4. Виды трелёвочных приспособлений для бесчokerной трелёвки / Types of skidding attachments for chokerless skidding

Источник: собственная схема авторов / Source: authors' own scheme

Основными производителями трелёвочных приспособлений, используемых в нашей стране, являются как отечественные, так и зарубежные компании. Большинство этих устройств гидрофицированы, адаптированы к гидросистемам агрегируемых тракторов и управляются с рабочего места оператора. Например, Великолукский машиностроительный завод «ВЕЛМАШ» выпускает широкую гамму клещевых захватов, которыми комплектуются трелёвочные приспособления для работы с сортаментами различной грузоподъёмности: С 70.48, С Р-20, С 30.30, С 70.40, С 70.41, С А-47.

Устройство трелёвочное универсальное УТУ-2 «ПАУК-М» (рисунок 5 / Figure 5) предназначено для транспортирования деревьев и хлыстов при проведении рубок леса, позволяет штабелировать бревна с помощью захвата на высоту до 1,55 м, а с помощью зажимной лапы – на высоту до 0,74 м. Толкателем-стенкой можно сталкивать остатки сучьев и веток при очистке площадки, а также подталкивать бревна к местам штабелирования.

Захват трелёвочный ЗТ-140 М (рисунок 6 / Figure 6) предназначен для бесчokerной трелёвки хлыстов и лесоматериалов диаметром от 50 до 700 мм на территории лесосеки. Представляет собой навесное оборудование, устанавливаемое на тракторы «Беларус» модификаций 82.2; 892.2; 920.2; 950.2; 952.2, 1221 (требуется

дополнительный комплект ЗИП) с наличием задней сельскохозяйственной навески.

Также применяются зарубежные конструкции трелёвочных приспособлений, как правило, с манипулятором. К ним относятся Uniforest Scorpion Pro1/Pro2/Pro3 (рисунок 7 / Figure 7), HRZ Fix-EZ (рисунок 8 / Figure 8) – комбинированный вариант (трелёвка и погрузка) – и другие.

Грейферные захваты устанавливают на колёсные и гусеничные тракторы или экскаваторы как отечественного, так и иностранного производства. Грейферный захват HRK – это трелёвочно-погрузочный манипулятор, оборудованный выдвижной стрелой, подъёмным гидроцилиндром и упорным погрузочным щитом, предназначенный для волочения, погрузки-разгрузки бревен и древесных стволов (рисунок 9 / Figure 9).

На основании проведённого анализа можно сделать вывод, что наиболее эффективным решением среди трелёвочных приспособлений является использование трелёвочной тележки с захватом, позволяющей механизировать процесс захвата трелюемых бревен и их перемещение в полуподвешенном состоянии.

2. Разработка новых конструкций трелёвочных тележек

Авторами предложены два варианта конструкции трелёвочной тележки, основанные на

Технологии. Машины и оборудование

патентном решении [24], позволяющем повысить эффективность процесса трелёвки.

На основании проведённого аналитического обзора установлено, что наибольшей эффективностью среди технических средств для трелёвки обладает навесная трелёвочная тележка с захватным механизмом, обеспечивающая механизацию процессов захвата трелеваемых лесоматериалов и их перемещения в полуподвешенном состоянии [3]. В развитие данного направления авторами на основе

патентного решения [24] предложены два варианта конструктивного исполнения трелёвочной тележки. Конструкция первого варианта (рисунок 10) содержит две опорные стойки 1, установленные на пневматических колёсах и связанные между собой горизонтальной поперечной балкой 2.



Рисунок 5 / Figure 5. Устройство трелёвочное универсальное УТУ-2 «ПАУК-М» / Universal skidding device UTU-2 «ПАУК-М»

Источник: <https://clck.ru/3MsLC4>



Рисунок 6 / Figure 6. Захват трелёвочный ЗТ-140 М / Skidding grapple ZT-140 M

Источник: <https://clck.ru/3MsLCK>



Рисунок 7 / Figure 7. Захват для бревен Uniforest Scorpion Pro1/Pro2/Pro3 / Uniforest Scorpion Pro1/Pro2/Pro3 log grab

Источник: <https://clck.ru/3MsLBH>



Рисунок 8 / Figure 8. Трелёвочный грейферный захват HRZ Lader / HRZ Lader skidding grapple

Источник: <https://clck.ru/3MsLDE>



Рисунок 9 / Figure 9. Трелёвочный грейферный захват на тележке HRZ Fix-HRK / HRZ Fix-HRK skidding grapple on trolley

Источник: <https://clck.ru/3MsLCY>

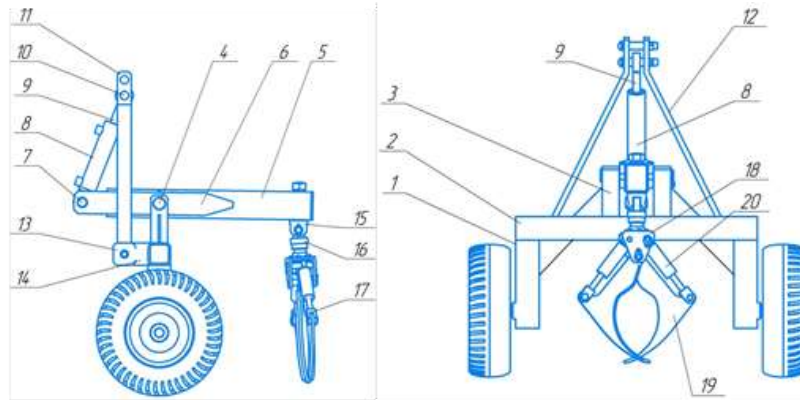


Рисунок 10. Навесная трелёвочная тележка (первый вариант) – схема

Figure 10. Mounted skidding trolley (first version) – scheme

Источник: разработано авторами / Source: developed by the authors

В центральной части указанной балки зафиксированы две вертикальные стойки 3, между которыми на оси 4 размещена горизонтальная продольная балка 5, дополнительно усиленная двумя пластинами 6. На торце пластины 6 посредством оси 7 закреплён корпус силового гидроцилиндра 8, шток 9 которого через ось 10 соединён с навесным устройством 11, предназначенным для агрегатирования тележки с трёхточечной навесной системой трактора. Данное навесное устройство включает раскосы 12, горизонтальную балку 13 и кронштейны 14, образующие единый узел с горизонтальной поперечной балкой 2. Подключение силового гидроцилиндра 8 к гидравлической системе трактора осуществляется через гибкие рукава высокого давления.

На противоположном конце горизонтальной продольной балки 5 на кронштейне 15 установлен ротатор 16 с гидравлическим захватом 17. Захват состоит из траверсы 18, двух клещевин 19 и двух гидроцилиндров 20, которые также подключены к гидросистеме трактора [2, 5].

Предложенная кинематическая схема позволяет механизировать операции захвата и сброски трелюемых сортиментов или хлыстов, осуществлять трелёвку в полуподвешенном

состоянии [3] при перемещении тележки непосредственно по поверхности почвы, что обеспечивает разгрузку задней оси трактора, снижение энергетических затрат и уменьшение негативного воздействия на почвенный покров. Благодаря применению трёхточечной навески (элементы 12–14) тележка эффективно адаптируется к неровностям рельефа и воспринимает значительные эксплуатационные нагрузки в рабочем режиме. При холостом ходе поднятие тележки над поверхностью почвы способствует снижению интенсивности износа ходовой части (опоры 1 и колёса) и повышению манёвренности трактора, что приобретает особую значимость в условиях стеснённого пространства лесосеки [2].

Разработанная 3D-модель трелёвочной тележки представлена на рисунке 11.

Второй вариант навесной трелёвочной тележки (рисунок 12, а) включает опорные стойки 1 с ходовыми колёсами 2, горизонтальную поперечную балку 3, а также стойки 4 с раскосами 5. На оси 6, размещённой между стойками 4, закреплена стрела 7. К одному концу стрелы 7 прикреплены кронштейны 8 с осью 9, на которой зафиксирован шток 10 силового гидроцилиндра 11, при этом корпус гидроцилиндра закреплён на нижней поперечной горизонтальной балке 12.

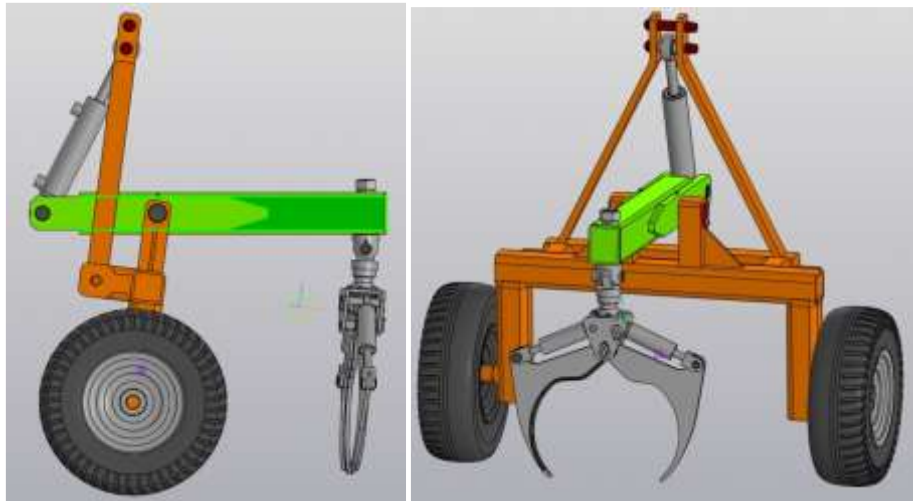


Рисунок 11 3D-модель навесной трелёвочной тележки (первый вариант)
Figure 11. 3D model of the mounted skidding trolley (first version)

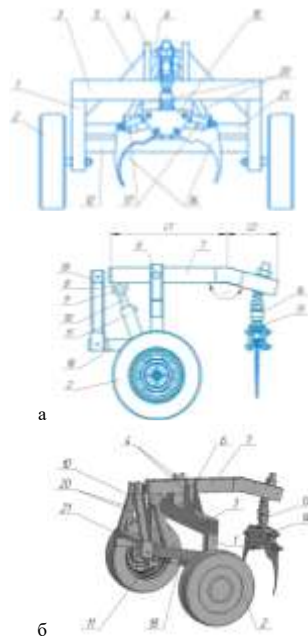


Рисунок 12. Навесная трелёвочная тележка (второй вариант)
Figure 12. Mounted skidding trolley (second version):
а – схема / a – scheme; б – 3D-модель / b – 3D model

На втором конце стрелы 7 закреплён гидравлический захват 13, включающий ротатор 14, траверсу 15, две клещевины 16 и два гидроцилиндра 17, подключённых к гидросистеме трактора. Навесное оборудование 19, включающее раскосы 20 и балку 21, крепится к опорным стойкам 1 с помощью раскосов 18. Это крепление позволяет присоединять тележку к трёхточечной навеске трактора.

Стрела 7 состоит из двух секций, расположенных под углом 165° друг к другу. Такая конструкция минимизирует риск столкновения конца перемещаемого сортимента (или пачки) со стрелой 7, что повышает общую

надёжность тележки. Соотношение длины горизонтальной части L_1 стрелы 7 к длине наклонной части L_2 составляет 1:0,45. Это уменьшает нагрузку, которую силовым гидроцилиндром 11 прикладывает к стреле 7.

Предложенная кинематическая схема второго варианта, аналогично первому, обеспечивает механизацию процессов захвата и сброски трелюемых сортиментов или хлыстов, а также позволяет осуществлять трелёвку в полуподвешенном состоянии при перемещении тележки непосредственно по поверхности почвы. Это способствует разгрузке задней оси трактора, снижению энергетических затрат и уменьшению

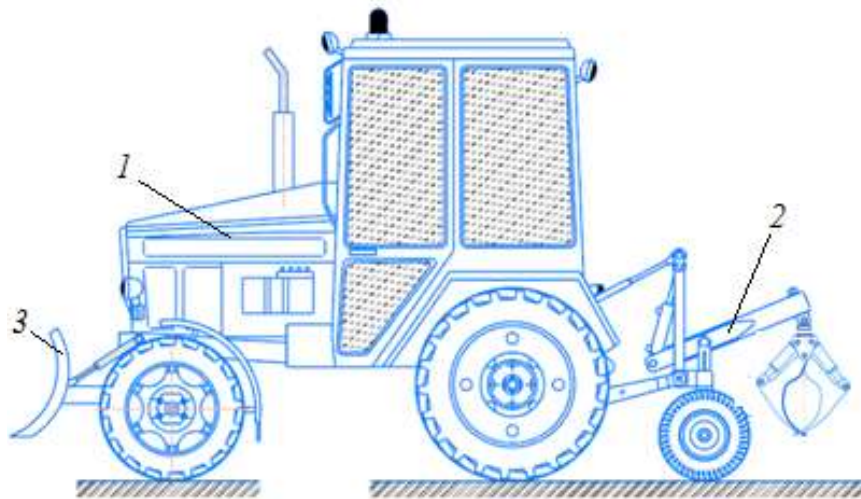
негативного воздействия на почвенный покров. Благодаря трёхточечной навеске (элементы 19–21) и шарнирному креплению стрелы 7 на оси 6 тележка эффективно адаптируется к неровностям рельефа и воспринимает значительные эксплуатационные нагрузки в рабочем режиме. При холостом ходе подъём тележки (посредством силового гидроцилиндра 11) обеспечивает снижение интенсивности износа ходовой части (опорные стойки 1 и колёса 2) и повышает манёвренность трактора, что особенно важно в условиях ограниченного пространства лесосеки.

Принцип работы навесной трелёвочной тележки. Трактор с тележкой, поднятой над грунтом, подъезжает к сортименту (группе сортиментов, хлыстов) таким образом, чтобы гидравлический захват 13 оказался над сортиментом на расстоянии 40–50 см от его торца. С помощью гидроцилиндра навески трактора по команде оператора тележка опускается на грунт, а посредством ротатора 14 гидравлический захват 13 ориентируется относительно сортимента. По команде оператора гидроцилиндры 17 раскрывают клещевины 16 захвата, после чего подаётся рабочая жидкость в поршневую полость силового гидроцилиндра 11, шток 10 которого перемещается вверх, поднимая связанный с ним конец стрелы 7; при этом противоположный конец стрелы с захватом 13 опускается. При достижении

захватом уровня грунта клещевины сводятся, осуществляя захват сортимента. Далее оператор переключает гидроцилиндр 11 в обратное положение, шток 10 опускается, противоположный конец стрелы поднимается, приподнимая сортимент над грунтом. Трактор перемещается к месту разгрузки. По прибытии клещевины раскрываются, и сортимент падает на грунт. Затем тележка поднимается, и цикл повторяется.

Агрегатирование тележки с трактором через трёхточечную навеску обеспечивает адаптацию к неровностям рельефа, восприятие эксплуатационных нагрузок и свободу маневра. При холостом ходе тележка поднимается над поверхностью почвы, что повышает манёвренность трактора и снижает износ ходовых колёс тележки.

Предложенные варианты трелёвочной тележки могут быть агрегатированы с различными транспортными средствами, в частности с трактором «Беларусь МТЗ-320», что расширяет его функциональные возможности и позволяет использовать его на лесозаготовках для трелёвки как отдельных поваленных деревьев, хлыстов или сортиментов, так и пачек небольшого объёма. Общий вид трактора МТЗ-320 с навесной трелёвочной тележкой представлен на рисунке 13.



1 – трактор Беларусь МТЗ-320; 2 – навесное трелёвочная тележка;
3 – бульдозерный отвал

Рисунок 13. Трактор МТЗ-320 с навесной трелёвочной тележкой
Figure 13. Belarus MTZ-320 tractor with mounted skidding trolley

3. Тяговый расчёт и определение производительности

Объём пачки сортиментов, трелюемой трактором, не должен превышать тяговое усилие трактора по сцеплению. Уравнение равномерного

движения трактора с грузом для трелёвки в полуподвешенном состоянии (расчётная схема на рисунке 14 / Figure 14) имеет вид:

$$F_k = P(f_T \pm i) + k \cdot G_n(f_T \pm i) + (1 - k) \cdot G_n(f_T \pm i), (1)$$

Технологии. Машины и оборудование

где F_k – касательная сила тяги трактора, Н; P – вес трактора, кН; $G_{п}$ – вес трелюемой пачки, кН; f_t – удельное сопротивление движению трактора, Н/кН; k – коэффициент, учитывающий расположение веса пачки между коником трактора и волоком; f_r – удельное сопротивление движению пачки по волоку, Н/кН; i – уклон местности, %.

Для трактора МТЗ-320 мощность двигателя $N = 26478$ Вт, коэффициент полезного действия $\eta = 0,85$, скорость движения на второй передаче $v = 1,36$ м/с. Касательная сила тяги:

$$F_k = \frac{N \cdot \eta}{v} = \frac{26478 \cdot 0,85}{1,36} = 16548,75 \text{ Н.}$$

Вес трелюемой пачки определяется из формулы (1). Приняв $P = 17,0$ кН, $f_t = 0,25$ Н/кН, $i = 0,025$, $k = 0,7$, $f_r = 0,7$ Н/кН, получаем:

$$G_{п} = \frac{F_k - P(f_t \pm i)}{k(f_t \pm i) + (1 - k)(f_r \pm i)} = \frac{16548,75 - 17,0(0,25 + 0,025)}{0,7(0,25 + 0,025) + (1 - 0,7)(0,7 + 0,025)} = 30840,9 \text{ Н.}$$

Проверка по сцеплению:

$$F_{сц} = (P + kG_{п})\mu = (15600 + 0,6 \cdot 59094,1) \cdot 0,4 = 20422,6 \text{ Н,}$$

где $\mu = 0,4$ – коэффициент сцепления колёс с грунтом (лето). Условие $F_{сц} \geq F_k$ выполняется.

Объём пачки (m^3) при объёмном весе древесины $\gamma = 8000$ Н/ m^3 :

$$Q = \frac{G_{п}}{\gamma} = \frac{30840,9}{8000} = 3,9 \text{ м}^3.$$

При длине сортимента 4,5 м площадь захвата составит $S = 3,9/4,5 = 0,86$ м². Радиус клещевин:

$$R = \sqrt{\frac{S}{K_y \pi}} = \sqrt{\frac{0,86}{0,8 \cdot 3,14}} = 0,58 \text{ м,}$$

где $K_y = 0,8$ – коэффициент плотности сортиментов в захвате. Из конструктивных соображений принимаем $R = 0,4$ м. Тогда фактическая площадь захвата:

$$S = \frac{\pi R^2}{0,8} = \frac{3,14 \cdot 0,4^2}{0,8} = 0,63 \text{ м}^2.$$

Объём трелюемой пачки $Q = 0,63 \cdot 4,5 = 2,8$ м³, вес $G_{п} = 2,8 \cdot 8000 = 22400$ Н.

Сменную производительность трактора определяем по формуле:

$$\Pi = \frac{(T_c - t_{пз}) \cdot \varphi_1 \cdot Q_{ср}}{t_{ц}},$$

где $T_c = 28800$ с (продолжительность смены); $t_{пз} = 3000$ с (время на подготовительно-заключительные работы); $\varphi_1 = 0,85$ – коэффициент использования времени смены; $Q_{ср} = 2,8$ м³ – объём пачки; $t_{ц}$ – средняя продолжительность рейса, с.

Время цикла:

$$t_{ц} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4,$$

где t_1 и t_2 – время движения трактора в холостом и грузовом направлениях; t_3 – время на прицепку и формирование пачки; t_4 – время на отцепку.

Расчёты проведены для средних расстояний трелёвки 100–300 м и объёмов хлыста 0,24–0,38 м³. Результаты сведены в таблицы 1–7 / Tables 1–7.

При увеличении скоростей движения ($V_{хол} = 2,49$ м/с, $V_{гр} = 1,36$ м/с) значения времени цикла и производительности изменяются (таблицы 6 и 7 / Tables 6 and 7, рисунок 16 / Figure 16).

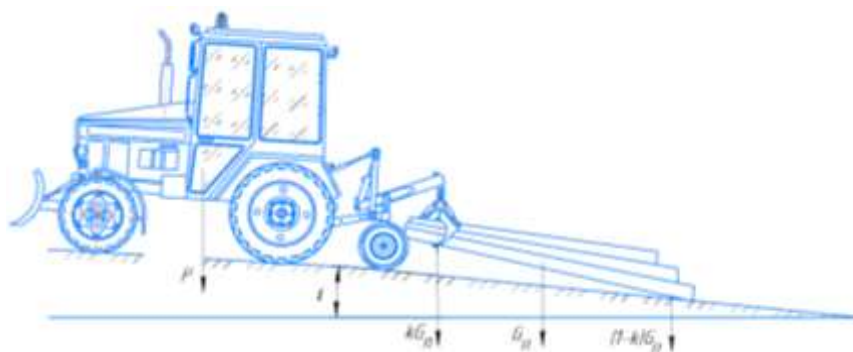


Рисунок 14 Расчётная схема нагрузки на трелёвочный трактор
Figure 14. Design scheme of load on the skidding tractor

Технологии. Машины и оборудование

Таблица 1

Время движения трактора в холостом направлении t_1 , с

Table 1

Tractor travel time in idle direction t_1 , s

| Средняя скорость, м/с / Average speed, m/s | Значение t_1 в зависимости от среднего расстояния трелёвки, м / Value of t_1 depending on the average skidding distance, m | | | | |
|--|--|------|-------|-------|-------|
| | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 |
| 1,81 | 55,3 | 82,9 | 110,5 | 138,1 | 165,8 |
| 2,49 | 40,2 | 60,2 | 80,3 | 100,4 | 120,5 |

Таблица 2

Время движения трактора в грузовом направлении t_2 , с

Table 2

Tractor travel time in loaded direction t_2 , s

| Средняя скорость, м/с / Average speed, m/s | Значение t_2 в зависимости от среднего расстояния трелёвки, м / Value of t_2 depending on the average skidding distance, m | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|
| | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 |
| 1,02 | 98,0 | 147,1 | 196,1 | 245,1 | 293,5 |
| 1,36 | 73,5 | 110,3 | 147,1 | 183,8 | 220,6 |

Таблица 3

Время на прицепку и отцепку пачки $t_3 + t_4$, с

Table 3

Time for hitching and unhitching the bunch $t_3 + t_4$, s

| Объём хлыста, м ³ / Log volume, m ³ | 0,24 | 0,26 | 0,28 | 0,30 | 0,32 | 0,34 | 0,36 | 0,38 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $t_3 + t_4$ | 588,3 | 556,9 | 530,0 | 506,7 | 486,3 | 468,2 | 452,2 | 437,9 |

Таблица 4

Время цикла трелёвки $t_{ц}$, с, при $V_{хол} = 1,81$ м/с, $V_{гр} = 1,02$ м/с

Table 4

Skidding cycle time $t_{ц}$, s, at $V_{idle} = 1.81$ m/s, $V_{loaded} = 1.02$ m/s

| Расстояние трелёвки, м / Skidding distance, m | Объём хлыста, м ³ / Log volume, m ³ | | | | | | | | |
|---|---|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| | 0,24 | 0,26 | 0,28 | 0,30 | 0,32 | 0,34 | 0,36 | 0,38 | |
| 100 | 741,6 | 710,2 | 683,3 | 660,0 | 639,6 | 621,5 | 605,5 | 591,2 | |
| 150 | 818,2 | 786,8 | 759,9 | 736,6 | 716,2 | 698,1 | 682,1 | 667,8 | |
| 200 | 894,9 | 863,5 | 836,6 | 813,3 | 792,9 | 774,8 | 758,8 | 744,5 | |
| 250 | 971,5 | 940,1 | 913,2 | 889,9 | 869,5 | 851,4 | 835,4 | 821,1 | |
| 300 | 1047,6 | 1016,2 | 989,3 | 966,0 | 945,6 | 927,5 | 911,5 | 897,2 | |

Таблица 5

Сменная производительность П, м³, при $V_{хол} = 1,81$ м/с, $V_{гр} = 1,02$ м/с

Table 5

Shift productivity П, m³, at $V_{idle} = 1.81$ m/s, $V_{loaded} = 1.02$ m/s

| Расстояние трелёвки, м / Skidding distance, m | Объём хлыста, м ³ / Log volume, m ³ | | | | | | | | |
|---|---|------|------|------|------|------|------|------|--|
| | 0,24 | 0,26 | 0,28 | 0,30 | 0,32 | 0,34 | 0,36 | 0,38 | |
| 100 | 77,9 | 81,4 | 84,6 | 87,6 | 90,4 | 93,0 | 95,4 | 97,7 | |
| 150 | 70,6 | 73,4 | 76,0 | 78,5 | 80,7 | 82,8 | 84,7 | 86,5 | |
| 200 | 64,6 | 66,9 | 69,1 | 71,1 | 72,9 | 74,6 | 76,2 | 77,6 | |
| 250 | 59,5 | 61,5 | 63,3 | 64,9 | 66,5 | 67,9 | 69,2 | 70,4 | |
| 300 | 55,2 | 56,9 | 58,4 | 59,8 | 61,1 | 62,3 | 63,4 | 64,4 | |

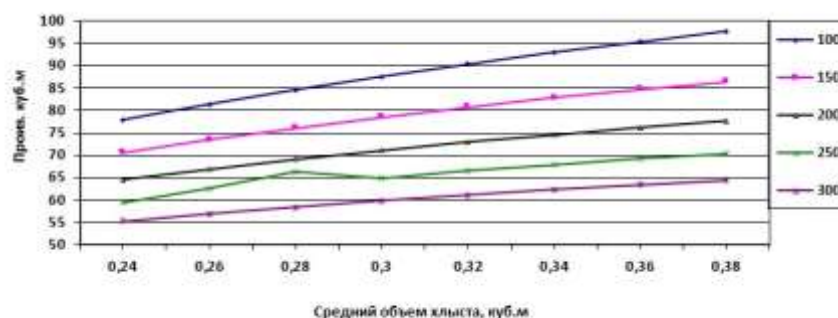


Рисунок 15. Зависимость сменной производительности трактора от среднего объёма хлыста и расстояния трелёвки ($V_{хол} = 1,81$ м/с, $V_{гр} = 1,02$ м/с)

Figure 15. Dependence of tractor shift productivity on average log volume and skidding distance ($V_{idle} = 1.81$ m/s, $V_{loaded} = 1.02$ m/s)

Таблица 6

Время цикла трелёвки $t_{ц}$, с, при $V_{хол} = 2,49$ м/с, $V_{гр} = 1,36$ м/с

Table 6

Skidding cycle time $t_{ц}$, s, at $V_{idle} = 2.49$ m/s, $V_{loaded} = 1.36$ m/s

| Расстояние трелёвки, м / Skidding distance, m | Объём хлыста, м ³ / Log volume, m ³ | | | | | | | | |
|---|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| | 0,24 | 0,26 | 0,28 | 0,30 | 0,32 | 0,34 | 0,36 | 0,38 | |
| 100 | 702,0 | 670,6 | 643,7 | 620,4 | 600,0 | 581,9 | 565,9 | 551,6 | |
| 150 | 758,8 | 727,4 | 700,5 | 677,2 | 656,8 | 638,7 | 622,7 | 608,4 | |
| 200 | 842,7 | 811,3 | 784,4 | 761,1 | 750,7 | 722,6 | 706,6 | 692,3 | |
| 250 | 872,5 | 841,1 | 814,2 | 790,9 | 770,5 | 752,4 | 736,4 | 722,1 | |
| 300 | 929,4 | 898,0 | 871,1 | 847,8 | 827,4 | 809,3 | 793,3 | 779,0 | |

Таблица 7

Сменная производительность П, м³, при $V_{хол} = 2,49$ м/с, $V_{гр} = 1,36$ м/с

Table 7

Shift productivity П, m³, at $V_{idle} = 2.49$ m/s, $V_{loaded} = 1.36$ m/s

| Расстояние трелёвки, м / Skidding distance, m | Объём хлыста, м ³ / Log volume, m ³ | | | | | | | | |
|---|---|------|------|------|------|------|-------|-------|--|
| | 0,24 | 0,26 | 0,28 | 0,30 | 0,32 | 0,34 | 0,36 | 0,38 | |
| 100 | 83,3 | 86,2 | 89,8 | 93,1 | 96,3 | 99,3 | 102,1 | 104,8 | |
| 150 | 76,2 | 79,4 | 82,5 | 85,3 | 88,0 | 90,5 | 92,8 | 95,0 | |
| 200 | 68,6 | 71,2 | 73,7 | 75,9 | 77,0 | 80,0 | 81,8 | 83,5 | |
| 250 | 66,2 | 68,7 | 71,0 | 73,1 | 75,0 | 76,8 | 78,5 | 80,0 | |
| 300 | 62,2 | 64,4 | 66,3 | 68,2 | 69,8 | 71,7 | 72,8 | 74,2 | |

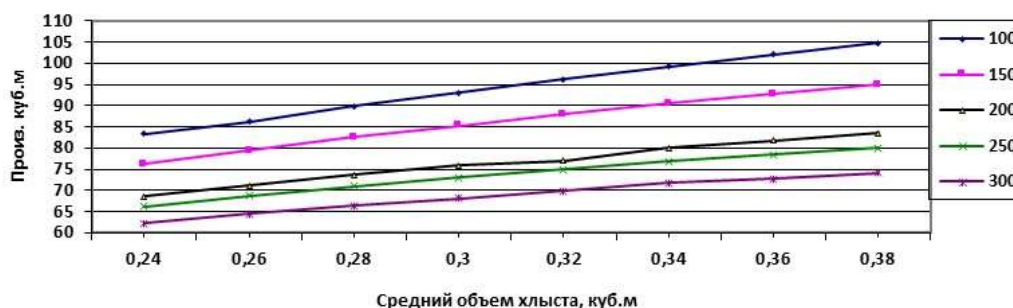


Рисунок 16. Зависимость сменной производительности трактора от среднего объёма хлыста и расстояния трелёвки ($V_{хол} = 2,49$ м/с, $V_{гр} = 1,36$ м/с)

Figure 16. Dependence of tractor shift productivity on average log volume and skidding distance ($V_{idle} = 2.49$ m/s, $V_{loaded} = 1.36$ m/s)

Обсуждение

Проведённый обзор свидетельствует о том, что повышение эффективности лесозаготовительных работ достижимо за счёт совершенствования трелёвочных приспособлений — захватов, лебёдок и тележек, — которые могут использоваться в составе тракторов общего назначения. Вместе с тем, применение исключительно трелёвочных захватов, агрегируемых с такими тракторами, является недостаточным [2]. Это обусловлено тем, что на заднюю ось трактора дополнительно передаётся нагрузка от трелюемого бревна (или пачки), что приводит к увеличению давления колёс на почву. Кроме того, при движении на уклоне указанное обстоятельство может вызывать потерю сцепления передних колёс с грунтом и создавать предпосылки для опрокидывания трактора.

Предложенная навесная трелёвочная тележка позволяет разгрузить заднюю ось трактора, снизить энергетические затраты и уменьшить вредное воздействие на почвенный покров за счёт перекачивания тележки непосредственно по поверхности грунта. Анализ производительности (таблицы 5, 7; рисунки 15, 16) показывает, что с увеличением объёма хлыста и скорости движения производительность возрастает, причём при расстоянии трелёвки 100 м и объёме хлыста 0,38 м³ она достигает 97,7–104,8 м³/смену в зависимости от скоростного режима.

Выводы

1. Перспективным техническим решением признаётся навесная трелёвочная тележка, оснащённая захватным механизмом грейферного или челюстного типа, который обеспечивает автоматизированный захват, надёжную фиксацию и принудительное освобождение трелюемых сортиментов либо хлыстов. Процесс трелёвки реализуется в полуподвешенном режиме, при котором тележка перемещается непосредственно по грунту (на лыжах либо колёсах малого диаметра), а комлевая часть пачки волочится за ней. Подобная кинематическая схема способствует разгрузке заднего моста трактора за счёт перераспределения

вертикальной нагрузки на переднюю ось и навесную систему, позволяет снизить тяговое сопротивление на 25–30% благодаря уменьшению трения пачки о грунт, а также уменьшает удельное давление на почвенный покров, что имеет критическое значение для сохранности лесных экосистем.

2. На основе запатентованного конструктивного решения разработаны две модификации тележек, различающиеся типом захватного органа и конструкцией системы подпрессоривания. Обе модификации отличаются модульным исполнением, агрегируются с тракторами общего назначения тягового класса 1,4–3,0 посредством стандартной трёхточечной навески категории 2 или 3 и не нуждаются в дополнительной гидрофикации, поскольку управление захватом осуществляется механическим или тросовым способом. Простота конструкции обуславливает высокую ремонтпригодность в условиях полевого сервиса.
3. Благодаря жёсткой трёхточечной навеске, оснащённой компенсаторами люфтов, обеспечивается адаптация тележки к микрорельефу волока за счёт угловых перемещений в продольной и поперечной плоскостях в диапазоне до $\pm 15^\circ$, что позволяет выдерживать пиковые эксплуатационные нагрузки, достигающие 2,5 от номинальной грузоподъёмности, без возникновения необратимых деформаций. При холостом ходе (порожня тележка) гидравлическая система трактора переводит её в транспортное положение с дорожным просветом не менее 400 мм, что полностью исключает контакт ходовой части с грунтом, уменьшает абразивный износ опорных элементов и повышает манёвренность трактора, сокращая радиус поворота на 20–25%, что является ключевым преимуществом при работе на стеснённых лесосеках.

Список литературы

1. Marra E., Laschi A., Fabiano F. et al. Impacts of wood extraction on soil: assessing rutting and soil compaction caused by skidding and forwarding by means of traditional and innovative methods. *European Journal of Forest Research*. 2022; 141: 1–16. – DOI: 10.1007/s10342-021-01420-w.
2. 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: 3–25. – DOI: 10.1007/s40725-021-00155-6.
3. Borz S.A., Mariş A.C., Kaakkurivaara N. Performance of Skidding Operations in Low-Access and Low-Intensity Timber Removals: A Simulation of Productivity and Fuel Consumption in Mature Forests. *Forests*. 2023; 14(2): 265. – DOI: 10.3390/f14020265.

4. Visser R., Spinelli R. Benefits and Limitations of Winch-Assist Technology for Skidding Operations. *Forests*. 2023; 14(2): 296. – DOI: 10.3390/f14020296.
5. Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E. The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management*. 2015; 338: 124–138.
6. Solgi A., Najafi A., Page-Dumroese D.S., Zenner E.K. Assessment of topsoil disturbance caused by different skidding machine types beyond the margins of the machine operating trail. *Geoderma*. 2020; 367: 114238.
7. Szewczyk K., Iwanicki P. Evaluating the suitability of machinery use during skidding of wood in pine stands. *Forest Research Papers*. 2019; 80: 219–226. – DOI: 10.2478/frp-2019-0020.
8. Handžić S., Đukić M., Petković V., Marčeta D. Productivity of TIMBERJACK 240A and LKT 81T Skidders at Selective Cutting and Longer Distances. *South-east European forestry*. 2024; 15. – DOI: 10.15177/see-for.24-08.
9. Kulak D., Stańczykiewicz A., Szewczyk G. Productivity and Time Consumption of Timber Extraction with a Grapple Skidder in Selected Pine Stands. *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2017; 38: 55–63.
10. Borz S., Mariş A.-C., Kaakkurivaara N. Performance of Skidding Operations in Low-Access and Low-Intensity Timber Removals: A Simulation of Productivity and Fuel Consumption in Mature Forests. *Forests*. 2023; 14: 265. – DOI: 10.3390/f14020265.
11. Visser R., Spinelli R. Assessment of a winch-assisted skidder in Castle Downs Forest, New Zealand. – 2020.
12. Dudek T., Janas D. The Productivity and the Costs Forwarding Wood of a Farm Tractor with a Trailer in Late Thinning and Cutting in Gaps of Forests. *Forests*. 2022; 13: 1309. – DOI: 10.3390/f13081309.
13. Visser R., Spinelli R. Benefits and Limitations of Winch-Assist Technology for Skidding Operations. *Forests*. 2023; 14: 296. – DOI: 10.3390/f14020296.
14. Labelle E.R., Kemmerer J. Business Process Reengineering of a Large-Scale Public Forest Enterprise Through Harvester Data Integration. *Croatian journal of forest engineering*. 2022; 43. – DOI: 10.5552/crojfe.2022.1129.
15. Söderberg J., Wallerman J., Almäng A., Möller J., Willén E. Operational prediction of forest attributes using standardised harvester data and airborne laser scanning data in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2021; 36: 1–9. – DOI: 10.1080/02827581.2021.1919751.
16. Kemmerer J., Labelle E.R. Using harvester data from on-board computers: a review of key findings, opportunities and challenges. *European Journal of Forest Research*. 2021; 140. – DOI: 10.1007/s10342-020-01313-4.
17. Gurski A., Ivashko V. Using transport telematics and remote diagnostics to improve vehicle maintenance and repair. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Physical-Technical Series*. 2020; 65: 375–383. – DOI: 10.29235/1561-8358-2020-65-3-375-383.
18. Сиваков В.В., Заикин А.Н., Грядунов С.С., Никитин В.В. Совершенствование управления сервисным обслуживанием сельскохозяйственной и лесозаготовительной техники // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*. – 2025. – Т. 29. – № 1. – С. 172–186. – DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-172-186.
19. Сиваков В.В. Цифровизация управления системой технического обслуживания и ремонта лесозаготовительной техники // *Хвойные бореальной зоны*. – 2024. – Т. 42. – № 1. – С. 64–71. – DOI: 10.53374/1993-0135-2024-1-64-71.
20. Terinov N., Toybich V., Gertz E., Mekhrentsev A., Azarenok V., Kazantsev P. Modernization of mini-tractor for wood skidding. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 875: 012086. – DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012086.
21. Gerts E., Mekhrentsev A., Terinov N., Urazova A. Substantiation of the Technological Process Parameters of Wood Skidding with a Mini Tractor in Increment Thinning. *Lesnoy Zhurnal (Forestry Journal)*. 2022; (6): 126–138. – DOI: 10.37482/0536-1036-2022-6-126-138.
22. Visser R., Leslie C. Productivity of a winch-assisted forwarder and processor: A case study in the Hawkes Bay region. – 2021.
23. Proto A.R., Macri G., Visser R., Russo D., Zimbalatti G. Comparison of Timber Extraction Productivity between Winch and Grapple Skidding: A Case Study in Southern Italian Forests. *Forests*. 2018; 9: 61. – DOI: 10.3390/f9020061.
24. Заикин А.Н., Сиваков В.В. Навесная трелёвочная тележка // Патент № 2785391 С1 Российская Федерация. – № 2022107784. – Заявл. 24.03.2022. – Оpubл. 07.12.2022.

References

1. Marra E., Laschi A., Fabiano F. et al. Impacts of wood extraction on soil: assessing rutting and soil compaction caused by skidding and forwarding by means of traditional and innovative methods. *European Journal of Forest Research*. 2022;141:1-16. DOI: 10.1007/s10342-021-01420-w.

2. 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;8:3-25. DOI: 10.1007/s40725-021-00155-6.
3. Borz S.A., Mariş A.C., Kaakkurivaara N. Performance of Skidding Operations in Low-Access and Low-Intensity Timber Removals: A Simulation of Productivity and Fuel Consumption in Mature Forests. *Forests*. 2023;14(2):265. DOI: 10.3390/f14020265.
4. Visser R., Spinelli R. Benefits and Limitations of Winch-Assist Technology for Skidding Operations. *Forests*. 2023;14(2):296. DOI: 10.3390/f14020296.
5. Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E. The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management*. 2015;338:124-138.
6. Solgi A., Najafi A., Page-Dumroese D.S., Zenner E.K. Assessment of topsoil disturbance caused by different skidding machine types beyond the margins of the machine operating trail. *Geoderma*. 2020;367:114238.
7. Szweczyk K., Iwanicki P. Evaluating the suitability of machinery use during skidding of wood in pine stands. *Forest Research Papers*. 2019;80:219-226. DOI: 10.2478/frp-2019-0020.
8. Handžić S., Đukić M., Petković V., Marčeta D. Productivity of TIMBERJACK 240A and LKT 81T Skidders at Selective Cutting and Longer Distances. *South-east European forestry*. 2024;15. DOI: 10.15177/seefor.24-08.
9. Kulak D., Stańczykiewicz A., Szweczyk G. Productivity and Time Consumption of Timber Extraction with a Grapple Skidder in Selected Pine Stands. *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2017;38:55-63.
10. Borz S., Mariş A.-C., Kaakkurivaara N. Performance of Skidding Operations in Low-Access and Low-Intensity Timber Removals: A Simulation of Productivity and Fuel Consumption in Mature Forests. *Forests*. 2023;14:265. DOI: 10.3390/f14020265.
11. Visser R., Spinelli R. Assessment of a winch-assisted skidder in Castle Downs Forest, New Zealand. 2020.
12. Dudek T., Janas D. The Productivity and the Costs Forwarding Wood of a Farm Tractor with a Trailer in Late Thinning and Cutting in Gaps of Forests. *Forests*. 2022;13:1309. DOI: 10.3390/f13081309.
13. Visser R., Spinelli R. Benefits and Limitations of Winch-Assist Technology for Skidding Operations. *Forests*. 2023;14:296. DOI: 10.3390/f14020296.
14. Labelle E.R., Kemmerer J. Business Process Reengineering of a Large-Scale Public Forest Enterprise Through Harvester Data Integration. *Croatian journal of forest engineering*. 2022;43. DOI: 10.5552/crojfe.2022.1129.
15. Söderberg J., Wallerman J., Almäng A., Möller J., Willén E. Operational prediction of forest attributes using standardised harvester data and airborne laser scanning data in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2021;36:1-9. DOI: 10.1080/02827581.2021.1919751.
16. Kemmerer J., Labelle E.R. Using harvester data from on-board computers: a review of key findings, opportunities and challenges. *European Journal of Forest Research*. 2021;140. DOI: 10.1007/s10342-020-01313-4.
17. Gurski A., Ivashko V. Using transport telematics and remote diagnostics to improve vehicle maintenance and repair. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Physical-Technical Series*. 2020;65:375-383. DOI: 10.29235/1561-8358-2020-65-3-375-383.
18. Sivakov V.V., Zaikin A.N., Gryadunov S.S., Nikitin V.V. Sovershenstvovanie upravleniya servisnym obsluzhivaniem sel'skokhozyaystvennoy i lesozagotovitel'noy tekhniki. [Improving service management of agricultural and logging machinery]. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*. 2025;29(1):172-186. (In Russ.). DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-172-186.
19. Sivakov V.V. Tsifrovizatsiya upravleniya sistemoy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta lesozagotovitel'noy tekhniki. [Digitalization of the maintenance and repair system management of logging machinery]. *Khvoynye boreal'noy zony = Conifers of the boreal zone*. 2024;42(1):64-71. (In Russ.). DOI: 10.53374/1993-0135-2024-1-64-71.
20. Terinov N., Toybich V., Gertz E., Mekhrentsev A., Azarenok V., Kazantsev P. Modernization of mini-tractor for wood skidding. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;875:012086. DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012086.
21. Gerts E., Mekhrentsev A., Terinov N., Urazova A. Substantiation of the Technological Process Parameters of Wood Skidding with a Mini Tractor in Increment Thinning. *Lesnoy Zhurnal (Forestry Journal)*. 2022;(6):126-138. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-6-126-138. (In Russ.)
22. Visser R., Leslie C. Productivity of a winch-assisted forwarder and processor: A case study in the Hawkes Bay region. 2021.
23. Proto A.R., Macri G., Visser R., Russo D., Zimbalatti G. Comparison of Timber Extraction Productivity between Winch and Grapple Skidding: A Case Study in Southern Italian Forests. *Forests*. 2018;9:61. DOI: 10.3390/f9020061.

24. Zaikin A.N., Sivakov V.V. Navesnaya trelevochnaya telezhka. [Mounted skidding cart]. Patent № 2785391 C1 Rossiyskaya Federatsiya. № 2022107784; zayavl. 24.03.2022; opubl. 07.12.2022. (In Russ.)

Сведения об авторах

Сиваков Владимир Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры "Транспортно-технологические машины и сервис" ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», пр. Станке Димитрова, 3, г. Брянск, 241037, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0175-9030>, e-mail: sv@bgitu.ru.

Заикин Анатолий Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры "Транспортно-технологические машины и сервис" ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», пр. Станке Димитрова, 3, г. Брянск, 241037, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1831-6893>, e-mail: zaikin.anatolij@yandex.ru.

✉ *Зеликов Владимир Анатольевич* – доктор технических наук, доцент кафедры организации перевозок и безопасности движения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

Information about the authors

Vladimir V. Sivakov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport and Technological Machines and Service, Bryansk State Technological University of Engineering, 3 Stanke Dimitrova Avenue, Bryansk, 241037, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0175-9030>, e-mail: sv@bgitu.ru.

Anatolii N. Zaikin – Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Department of Transport and Technological Machines and Service, Bryansk State Technological University of Engineering, 3 Stanke Dimitrova Avenue, Bryansk, 241037, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1831-6893>, e-mail: zaikin.anatolij@yandex.ru.

✉ *Vladimir A. Zelikov* – Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Transportation Organization and Traffic Safety, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

✉ – Для контактов | Corresponding author