

Теоретическое обоснование параметров движителя колесно-гусеничной лесной машины

А.С. Дмитриев^{1a}, И.С. Должиков^{1b}, О.А. Куницкая^{2c}, Е.Г. Хитров^{3d},
В.М. Дьяченко^{4e}, А.С. Швецов^{5f}

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
ул. 2-я Красноармейская, 4, Санкт-Петербург, Россия

² Арктический государственный агротехнологический университет,
Сергеляхское шоссе, 3, Якутск, Республика Саха (Якутия)

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,
ул. Ивана Черных, 4, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Военно-воздушная академия им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, ул. Маршала Жукова, 1, Сызрань, Россия

^a dmitriev.nauka@mail.ru, ^b idolzhikov222@mail.ru, ^c ola.ola07@mail.ru, ^d yegorkhitrov@gmail.com,

^e Volodya.Dyachenko1986@mail.ru, ^f Kapitan2304@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-3095-6014>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>, ^c <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>,

^d <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>, ^e <https://orcid.org/0009-0003-0510-7579>, ^f <https://orcid.org/0009-0003-3724-7082>

Статья поступила 09.01.2024, принята 06.02.2024

В Российской Федерации значительная часть лесопользователей, судя по годовому объему заготовки древесины, относится к мелким или даже малообъемным предприятиям. Такие лесопользователи обычно не используют специальные, и достаточно дорогие, лесные механизмы, а работают на машинах, созданных на базе колесных сельскохозяйственных тракторов малого и среднего класса тяги. Эти тракторы при своей сравнительно низкой стоимости в приобретении и эксплуатации обладают хорошей надежностью и значительной универсальностью, которая заключается в том, что их можно использовать не только на лесосечных и лесохозяйственных работах, но и для коммунального хозяйства и собственно сельскохозяйственных работ, что обеспечивает их круглогодичную эффективную эксплуатацию. Однако при работе в сложных условиях — на глубоком снеге, при слабонесущих почвогрунтах, на подъемах таким тракторам не хватает тягового усилия. В этой связи в сельскохозяйственном производстве разработан и успешно используется достаточно простой способ перевода колесных тракторов на полугусеничный ход. Это обеспечивает существенное повышение их проходимости в сложных условиях эксплуатации, повышение силы тяги и существенную экономию топлива. В данной статье обоснованы необходимые зависимости и уравнения, позволяющие рассчитать комплекс параметров, определяющих основные показатели работы лесной машины с полугусеничным движителем в заданных почвенно-грунтовых условиях эксплуатации.

Ключевые слова: полугусеничный ход; лесозаготовка; лесные машины; трелевка; лесохозяйственные работы; опорная проходимость.

Theoretical substantiation of the propulsion parameters of a wheeled tracked forest vehicle

A.S. Dmitriev^{1a}, I.S. Dolzhikov^{1b}, O.A. Kunitskaya^{2c}, E.G. Khitrov^{3d},
V.M. Dyachenko^{4e}, A.S. Shvetsov^{5f}

¹ St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya St., St. Petersburg, Russia

² Arctic State Agrotechnological University; 3 km, Sergelyakhskoye Shosse, Bld. 3, Yakutsk, Republic of Sakha)

³ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, Russia

⁴ St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4, Ivan Chernykh St., St. Petersburg, Russia

^a dmitriev.nauka@mail.ru, ^b idolzhikov222@mail.ru, ^c ola.ola07@mail.ru, ^d yegorkhitrov@gmail.com,

^e Volodya.Dyachenko1986@mail.ru, ^f Kapitan2304@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-3095-6014>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>, ^c <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>,

^d <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>, ^e <https://orcid.org/0009-0003-0510-7579>, ^f <https://orcid.org/0009-0003-3724-7082>

Received 09.01.2024, accepted 06.02.2024

In the Russian Federation, a significant proportion of forest users, in terms of the annual volume of timber harvesting, belong to small or even low-volume enterprises. Such forest users usually do not use special, and rather expensive, forestry machines, but work on

machines created on the basis of wheeled agricultural tractors of small and medium class traction. These tractors, with their relatively low cost of purchase and operation, have good reliability and significant versatility, which lies in the fact that they can be used not only for logging and forestry work, but also for public utilities and agricultural work proper, which ensures their year-round efficient operation. However, when working in difficult conditions – on deep snow, with weakly bearing soils, on ascents, such tractors lack traction. In this regard, a fairly simple method of converting wheeled tractors to a half-track has been developed and successfully used in agricultural production. This ensures a significant increase in their cross-country ability in difficult operating conditions, increased traction, and significant fuel economy. This article substantiates the necessary dependencies and equations that allow us to calculate a set of parameters that determine the main performance indicators of a forest machine with a semi-tracked propulsion in specified soil and soil operating conditions.

Keywords: half-track running; logging; forestry machines; skidding; forestry work; supporting patency.

Введение. В Российской Федерации подавляющее большинство лесопользователей, судя по годовым объемам работ, относятся к мелким и малообъемным. Они выполняют работы по заготовке древесины, лесовосстановлению, другим лесохозяйственным мероприятиям, включая подряды в рамках компенсационного лесовосстановления [1–4].

Такие лесопользователи, в основном, помимо лесосечных и лесовосстановительных работ, занимаются другими подрядными работами, включая сельское хозяйство. При этом обычно используются системы машин на базе наиболее широко распространенных колесных сельскохозяйственных тракторов малого и среднего класса тяги [5–8]. Они достаточно дешевы в приобретении и обслуживании, могут быть перемещены своим ходом между рабочими участками. В Российской Федерации это в основном колесные тракторы Минского тракторного завода, широко известные под аббревиатурой МТЗ. Очень часто можно услышать мнение потребителей, что по соотношению цена/качество это лучшие тракторы на российском рынке.

Но в сложных условиях эксплуатации — глубокий снежный покров, слабонесущие почвогрунты, потребность в большой силе тяги на крюке, например, при работе с плугом и бороной, эти тракторы в своей колесной версии «не тянут» [9]. Для решения этой проблемы разработано и успешно используется в России и за рубежом достаточно простое техническое решение, позволяющее в короткое время и без больших затрат переоборудовать ходовую часть колесного трактора в полугусеничный ход, когда передний мост трактора остается колесным, а задний становится гусеничным (рис. 1).

Благодаря использованию такого технического решения у трактора существенно снижается давления на поверхность движения и повышается крюковая сила тяги [10]. Это существенно повышает его эксплуатационные возможности для применения на лесосечных и лесохозяйственных работах, используя такую комбинированную ходовую часть как базу для различных специальных лесных машин (рис. 1 и 2).

Возможность быстрой смены колесного хода на полугусеничный и обратно позволяет перемещать такую лесную машину своим ходом между делянками, не затрачиваясь на тягач и трал. Для мелких и малообъемных лесозаготовительных предприятий это очень большое преимущество, поскольку, обычно, они имеют дело с небольшими по площади и рассредоточенными по лесному массиву делянками [1–4].

Повышение крюковой силы тяги позволяет лесной машине даже на базе трактора малого класса тяги работать с лесным плугом, например, при создании обяза-

тельных минерализованных полос вокруг лесных культур при искусственном лесовосстановлении [11–14].



Рис. 1. Трактор МТЗ с полугусеничным двигателем (фронтальный погрузчик)



Рис. 2. Форвардер на базе трактора на полугусеничном ходу

Поскольку в настоящее время на практике большая часть тракторов МТЗ на полугусеничном ходу используется на трелевке в качестве форвардеров (сортименто-подборщиков) в тяжелых условиях эксплуатации — глубокий снег, слабонесущие почвогрунты, для хороших условий эксплуатации на базе полугусеничных лесных машин возможно создавать бесчokerные трелевочные тракторы или даже универсальные трелевщики, также называемые комбитрелевщики, по примеру колесного трактора *HSM208F Combi* компании *HSM Hohenloher Spezial-Maschinenbau GmbH*, одновременно совмещающем в своей конструкции возможности форвардера и бесчokerного трелевочного трактора [15].

Такие небольшие и при этом достаточно маневренные тракторы, помимо лесосечных работ на малообъемных рубках спелых и перестойных насаждений, могут успешно использоваться на рубках ухода за лесом и машинной очистке лесосек от порубочных остатков [16–21].

Вместе с тем, при проведении направленного информационного поиска в специальной литературе и на ресурсах глобальной информационной сети Интернет

нами не встречено работ, посвященных обоснованию параметров движителя для колесного-гусеничного хода лесных машин.

Материалы и методы исследования. Используются методы математического моделирования процессов взаимодействия движителей лесных машин с почвогрунтами лесосек, а также литературные источники и справочные данные о строении и физико-механических свойствах лесных почвогрунтов.

Результаты исследования. Рассмотрим основные требования, предъявляемые к параметрам и режимам работы движителей лесных машин с точки зрения современной теории лесосечных и лесохозяйственных работ.

Основными показателями, характеризующими движитель в конкретных почвенно-грунтовых условиях, являются: коэффициент сопротивления движению φ_R , связанный, главным образом, с сопротивлением почвогрунта деформированию [22]; требуемая мощность двигателя машины N , обеспечивающая силу тяги, достаточную для движения машины с заданной скоростью; коэффициент сцепления μ ; коэффициент тяги φ_P (разность коэффициентов μ и φ_R); глубина образующейся колеи h .

Коэффициенты φ_R и μ рассчитывают, главным образом, по показателям нормального и касательного сопротивления почвогрунта воздействию движителя соответственно. Используются, например, такие формулы [23]:

$$\varphi_R = \varphi_{R, \text{движ}} + \varphi_{R, \text{гр}} = \varphi_{R, \text{движ}} + \frac{b}{w} \int_0^h p \, dh, \quad (1)$$

где $\varphi_{R, \text{гр}}$ — составляющая, связанная с сопротивлением почвогрунта колееобразованию; $\varphi_{R, \text{движ}}$ — составляющая, связанная с сопротивлением движению, обусловленным непосредственно движителем (например, гистерезисными потерями при деформации колеса, налипанием грунта и проч., причем, как правило, $\varphi_{R, \text{движ}} \ll \varphi_{R, \text{гр}}$); b — усредненная ширина пятна контакта движителя с почвогрунтом; w — вес машины, приведенный к единичному движителю; p — усредненное нормальное давление по пятну контакта:

$$\mu = \frac{b}{G} \int_0^l \tau \, dx, \quad (2)$$

где l — усредненная длина пятна контакта; τ — сопротивление почвогрунта сдвигу по горизонтали; x — горизонтальная координата (отсчитывается вдоль пятна контакта от его «начала») [22].

Коэффициент сопротивления движению позволяет оценить силу сопротивления, а, следовательно, и мощность двигателя машины, обеспечивающую передачу требуемого крутящего момента. Требуемую мощность двигателя можно оценить по неравенству:

$$N \geq \frac{F_{\text{сопр}} v}{\eta} = \frac{v}{\eta} \sum_{i=1}^n \varphi_{R,i} w_i, \quad (3)$$

где $F_{\text{сопр}}$ — сила сопротивления движению машины; v — скорость машины; η — коэффициент полезного действия трансмиссии, нижний индекс « i » соответствует

номеру единичного движителя; n — число единичных движителей.

В простейшем случае, когда все единичные движители одинаковы по своим параметрам, и нагрузку на них можно считать распределенной равномерно, формула (3) упрощается:

$$N \geq \frac{v}{\eta} \varphi_R W, \quad (4)$$

где W — вес машины.

Оценка (4) используется, например, для большинства современных колесных форвардеров.

При необходимости учесть угол подъема машины α (движение по поверхности с уклоном) [24] условие (3) следует переписать:

$$N \geq \frac{v}{\eta} \left(W \sin \alpha + \sum_{i=1}^n \varphi_{R,i} w_i \right). \quad (5)$$

Строго говоря, при больших углах подъема в формуле (5) потребуются уточнение коэффициентов $\varphi_{R,i}$: $\varphi_{R,i} = \varphi_{R,i}(\alpha)$, поскольку при отклонении вектора результирующей нагрузки от нормали к почвогрунту деформации увеличиваются [22].

Далее, параметры движителя должны обеспечивать опорную проходимость машины [25], т. е. расчетное значение коэффициента тяги при движении по горизонтальной поверхности должно быть, как минимум, не отрицательно [22]:

$$\varphi_P = \mu - \varphi_R \geq 0, \quad (6)$$

где μ — коэффициент сцепления; φ_R — коэффициент сопротивления движению, а с учетом угла подъема необходимо выполнение неравенства:

$$\varphi_P = \mu - \varphi_R \geq \text{tg } \alpha \quad (7)$$

Кроме того, коэффициент тяги используется и для оценки профильной проходимости по высоте одиночного препятствия z , которое способна преодолеть машина:

$$z = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \varphi_P^2}} \right) \xi \geq z_{\text{крит}}, \quad (8)$$

где ξ — параметр, связанный с типом движителя, например:

$$\xi \approx l \approx \frac{d}{2}, \quad (9)$$

где d — диаметр колеса.

Условие (6) с учетом (8) примет вид:

$$\varphi_P = \mu - \varphi_R \geq \sqrt{\left(\frac{z_{\text{крит}} + \xi}{\xi} \right)^2 - 1} \quad (10)$$

При необходимости учесть угол подъема запишем:

$$\begin{aligned} \varphi_P &= \mu - \varphi_R \\ &\geq \text{tg } \alpha + \sqrt{\left(\frac{z_{\text{крит}} + \xi}{\xi} \right)^2 - 1}, \end{aligned} \quad (11)$$

С экологической точки зрения, весьма актуальной в современных условиях, воздействие движителя на почвогрунт должно быть ограничено таким образом, что-

бы глубина образующейся колеи не превосходила критического значения (как правило, 0,2 м) [26; 27]:

$$h \leq h_{\text{крит}} \quad (12)$$

Сложность исследований в области обоснования параметров движителей, совместимых с заданными почвенно-грунтовыми условиями, во многом обусловлена оценкой глубины колеи h .

В рассматриваемом нами случае колея формируется в два этапа, под воздействием колесного, а затем гусеничного движителя. Запишем:

$$h a h_{\text{к}} + h_{\text{г}} \leq h_{\text{крит}} \quad (13)$$

Здесь и далее нижний индекс «к» соответствует колесному движителю, нижний индекс «г» — гусеничному движителю.

Параметры колесной и гусеничной пары лесной машины с комбинированным движителем, очевидно, должны быть разумным образом согласованы. Положим, что коэффициенты тяги, обеспечивающие условие (11) для колес и гусениц, должны быть в идеальном случае равны:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{к}} - \varphi_{R,\text{к}} - \sqrt{\left(\frac{z_{\text{крит}} + \xi_{\text{к}}}{\xi_{\text{к}}}\right)^2 - 1} \\ = \mu_{\text{г}} - \varphi_{R,\text{г}} - \sqrt{\left(\frac{z_{\text{крит}} + \xi_{\text{г}}}{\xi_{\text{г}}}\right)^2 - 1} \geq \text{tg } \alpha, \end{aligned} \quad (14)$$

либо достаточно близки по значению.

Коэффициенты сцепления найдем по формуле (2), но с учетом существенного различия длин пятна контакта:

$$\mu_{\text{к}} = \frac{b_{\text{к}}}{G_{\text{к}}} \int_0^{l_{\text{к}}} \tau dx, \quad (15)$$

$$\mu_{\text{г}} = \frac{b_{\text{г}}}{G_{\text{г}}} \int_0^{l_{\text{г}}} \tau dx \quad (16)$$

Поскольку вначале колея образуется под воздействием колесного движителя, уравнения для оценки сопротивления движению следует модифицировать. Возможным вариантом модификации является:

$$\varphi_{R,\text{к}} = \varphi_{R,\text{к}} + \frac{b_{\text{к}}}{G_{\text{к}}} \int_0^{h_{\text{к}}} p_{\text{к}}(h) dh, \quad (17)$$

$$\varphi_{R,\text{г}} = \frac{b_{\text{г}}}{G_{\text{г}}} \int_{h_{\text{к}}}^{h_{\text{к}}+h_{\text{г}}} p_{\text{г}}(h) dh + \frac{b_{\text{г}} - b_{\text{к}}}{G_{\text{г}}} \int_0^{h_{\text{к}}} p_{\text{г}}(h) dh \quad (18)$$

Наконец, с учетом принятых обозначений на основании (5) запишем для требуемой мощности двигателя машины:

$$N \geq 2v \left(\frac{G_{\text{к}}(\varphi_{R,\text{к}} + \sin \alpha)}{\eta_{\text{к}}} + \frac{G_{\text{г}}(\varphi_{R,\text{г}} + \sin \alpha)}{\eta_{\text{г}}} \right). \quad (19)$$

Для получения дальнейшей информации по обоснованию параметров движителя комбинированной машины следует рассмотреть подробнее взаимодействие колесной

и гусеничной пары с грунтом. Расчет колеобразования и сцепных свойств движителя лесной машины представляет собой нетривиальную задачу, решаемую применительно к конкретной научно-практической задаче на основе обработки сведений, полученных при проведении вычислительного эксперимента. Известные результаты относятся, в основном, либо к колесным, либо к гусеничным машинам. Исследований, учитывающих последовательное воздействие колеса, а затем гусеницы, и устанавливающих приемлемые параметры такого комплексного воздействия, практически не представлено.

Далее обоснование параметров движителя будем вести в следующем порядке:

1. На первом этапе определим допустимые значения нагрузки для колесного и гусеничного движителей с учетом физико-механических свойств почвогрунта по условию (13).

2. Установим диапазон среднего давления p по пятну контакта, ориентируясь на который, целесообразно проводить оценку тягово-сцепных свойств движителей.

3. С учетом оценки диапазона давления рассчитаем коэффициенты тяги, что позволит обосновать распределение нагрузки между колесной и гусеничной парами.

4. На заключительном этапе расчета полученные соотношения используем при обосновании требуемой мощности двигателя машины, обеспечивающей заданную среднюю скорость движения лесной машины с учетом свойств почвогрунта.

Общий подход к составлению уравнения, связывающего тип и геометрические параметры движителя, нагрузку и физико-механические свойства почвогрунта, известен и изложен в работах [22; 28–32]. В зависимости от принятых допущений, получены различные варианты уравнения для глубины колеи.

Например, апробирована и хорошо зарекомендовала себя формула, позволяющая учесть время действия нагрузки и возможную потерю несущей способности почвогрунта [22]:

$$h_0 \frac{p_s}{p_s - p} \cdot \frac{K J p a b}{\sqrt{1 - J p K}} \arctg \frac{H - h}{a b \sqrt{1 - J p K}}, \quad (20)$$

где p_s — несущая способность почвогрунта; K — параметр, зависящий от физико-механических свойств и используемой реологической модели почвогрунта, учитывающий время воздействия движителя на почвогрунт; коэффициенты J , a — параметры, учитывающие соотношение усредненной ширины и длины пятна контакта; H — мощность деформируемого слоя почвогрунта (глубина распространения деформаций либо толщина деформируемого слоя почвогрунта).

В простейшем случае, когда деформации почвогрунта считаются мгновенными [22], принимают:

$$K = \frac{1}{E}, \quad (21)$$

где E — модуль общей деформации почвогрунта.

Повысить точность модели возможно за счет введения параметра жесткости, зависящего от времени воздействия:

$$K = \frac{1}{E} - \frac{1}{E} \exp\left(-t \frac{E}{\omega}\right), \quad (22)$$

где ω — реологический параметр почвогрунта, связанный с вязкостью; t — время воздействия движителя на почвогрунт по длине пятна контакта:

$$t = \frac{l}{v}, \quad (23)$$

где v — поступательная скорость машины; l — усредненная длина пятна контакта.

Параметры J , a определяются по несложным зависимостям:

$$J = \frac{0,03b + l}{0,6b + 0,43l}, \quad (24)$$

$$a = 0,64 \cdot \left(1 + \frac{b}{H}\right), \quad (25)$$

однако если для гусеничного движителя усредненную длину пятна контакта можно условно считать постоянной величиной, связанной с длиной проекции гусеницы на почвогрунт:

$$l_r = L_r, \quad (26)$$

то для колесного движителя эта величина переменна и определяется с учетом деформации как почвогрунта, так и самого движителя:

$$l_k = \sqrt{h_z d - h_z^2} + \sqrt{(h_z + h_k)d - (h_z + h_k)^2}, \quad (27)$$

где h_z — радиальная деформация колесного движителя, для практической оценки которой предложены различные зависимости, полученные на основе аппроксимации расчетных и экспериментальных данных, например:

$$h_z = 0,069b_k^{0,38} G_k^{0,66} d^{-0,40} H_T^{-0,061} p_w^{-0,64} h_k^{-0,646}, \quad (28)$$

где G в [МН]; H_T — высота шины; p_w в [МПа] — давление в шине.

Отметим, что при определенных допущениях длину пятна контакта колесного движителя с почвогрунтом принимают по формуле:

$$l_k = \frac{d}{2} \quad (29)$$

Мощность деформируемого слоя почвогрунта принимают по формуле:

$$H = 2b \quad (30)$$

Показано, что даже при использовании формул (26), (29) в зависимости от типа движителя уравнение (20) не имеет аналитического решения. В качестве решения этой проблемы предложено использование вычислительного эксперимента. Суть подхода состоит в том, что решение (20) проводится численно при различных сочетаниях параметров движителя и грунта, далее результаты расчетов аппроксимируются зависимостями, удобными для практического использования [22].

Кроме того, важно учесть, что несущая способность не является характеристикой только самого почвогрунта, но также зависит от параметров пятна контакта движителя с ним и глубины образующейся колеи [22]. Эти обстоятельства рассмотрены ранее и учтены в следующих зависимостях:

$$p_s = p_{s0} \alpha_z, \quad (31)$$

где $p_{s,0}$ — несущая способность почвогрунта без учета мощности деформируемого слоя почвогрунта; α — коэффициент учета мощности деформируемого слоя почвогрунта.

Формула для расчета p_{s0} :

$$p_{s,0} = 0,5J_1 B_1 N_1 b \gamma + N_2 \gamma h + J_3 B_3 N_3 C, \quad (32)$$

где γ — удельный вес почвогрунта; C — удельное сцепление частиц почвогрунта; J_1, J_3 — коэффициенты, учитывающие соотношение усредненной длины и ширины пятна контакта; N_1, N_2, N_3 — коэффициенты, учитывающие фрикционные свойства почвогрунта; B_1, B_3 — коэффициенты, учитывающие отклонения угла вектора результирующей нагрузки от нормали к поверхности контакта:

$$J_1 = \frac{l}{l + 0,4b}, \quad J_3 = \frac{l + b}{l + 0,5b}, \quad (33)$$

$$B_1 = \frac{\pi - 4\beta \operatorname{tg} \varphi}{\pi + 4\beta \operatorname{tg} \varphi}, \quad B_3 = \frac{3\pi - 2\beta}{3\pi + 2\beta}, \quad (34)$$

$$N_1 = \frac{1 - \text{III}^4}{\text{III}^5}, \quad N_2 = \frac{1}{\text{III}^2}, \quad N_3 = \frac{2 \cdot (1 + \text{III}^2)}{\text{III}^3}, \quad (35)$$

$$\text{III} = \operatorname{tg} \frac{\pi - 2\varphi}{4},$$

$$\beta = \alpha + \delta, \quad (36)$$

где φ — угол внутреннего трения почвогрунта; δ — угол отклонения, связанный с соотношением нормальной и касательной составляющих воздействия движителя на почвогрунт.

Формула для расчета α_z :

$$\alpha_z = 1 + h \cdot \frac{\frac{\sqrt{2}b}{z} \operatorname{tg} \varphi \cos \frac{3\varphi}{4} \exp\left[\left(\frac{\pi + 3\varphi}{4}\right) \operatorname{tg} \frac{3\varphi}{4}\right]}{2 \frac{H}{\cos \beta} \left(\frac{H}{\cos \beta} - h - h \cdot \operatorname{la} \frac{\sqrt{2}b}{z} \operatorname{tg} \varphi \cos \frac{3\varphi}{4} \exp\left[\left(\frac{\pi + 3\varphi}{4}\right) \operatorname{tg} \frac{3\varphi}{4}\right]\right)} \quad (37)$$

В некоторых случаях, например, при сравнительно неглубокой колее для практических расчетов используется упрощенная оценка:

$$p_s = 0,1E. \quad (38)$$

Приведенные уравнения позволяют провести численное решение уравнения для глубины колеи (20) отдельно для колесного и гусеничного движителя. При варьировании нагрузки G возможно численное интегрирование выражений (17), (18), позволяющее рассчитать коэффициент сопротивления φ_R также отдельно для колесного и гусеничного движителя.

Для получения оценки сцепных свойств и проходимости комбинированной машины потребуется интегрирование (15), (16), в связи с чем примем зависимости для τ . Общее выражение, связывающее сдвиговые свойства грунта и деформацию, представлено формулой:

$$\tau = \frac{1}{\frac{1}{\tau_{\max}} + \frac{t_{rp}}{Gj}}, \quad (39)$$

где τ_{\max} — максимальное сопротивление почвогрунта сдвигу; t_{rp} — шаг грунтозацепов; G — модуль сдвига

почвогрунта; j — сдвиговая деформация, для которой, как правило, принимается линейная зависимость:

$$j = Sx, \quad (40)$$

где S — коэффициент буксования.

Вопрос определения максимального сопротивления почвогрунта сдвигу рассмотрен в [22], получено выражение:

$$\tau_{\max} = p \operatorname{tg} \varphi + C \zeta \operatorname{He} \zeta, \quad (41)$$

где коэффициент ζ характеризует снижение сопротивления сдвигу при срезе слоев почвогрунта:

$$\zeta = 1 - \frac{j - j_0}{t_{\text{гр}}} \operatorname{He} j - j_0, \quad (42)$$

параметр j_0 характеризует сдвиговую деформацию почвогрунта до начала среза:

$$j_0 = \frac{\tau_0 t_{\text{гр}}}{G} \left(\sqrt{\frac{G}{C}} - 1 \right), \quad (43)$$

где τ_0 — сопротивление почвогрунта сдвигу без учета среза:

$$\tau_0 = p \operatorname{tg} \varphi + C. \quad (44)$$

Литература

1. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Чураков А.А. Эффективные технологии и системы машин для малообъемных заготовок древесины // Энергия: экономика, техника, экология. 2018. № 2. С. 61-66.
2. Григорьев И.В. Параметры и показатели работы перспективного форвардера для малообъемных лесозаготовок // Актуальные направления науч. исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6, № 4 (40). С. 21-25.
3. Григорьев И.В. Повышение эффективности освоения лесосечного фонда малой концентрации // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Второй Всерос. науч.-практической конф. с междунар. участием, посвящ. 65-летию высш. лесного образования в Республике Карелия (24 мая 2016 г.). Петрозаводск, 2016. С. 62-65.
4. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Нгуен Ф.З. Система машин и технология работ для малообъемных лесозаготовок // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы третьей Всерос. науч.-практической конф. с междунар. участием (30 мая 2017 г.). Петрозаводск, 2017. С. 51-53.
5. Сафин Р.Р., Григорьев И.В., Григорьева О.И., Разумов Е.Ю. Технология и машины лесовосстановительных работ. М.: Деревообрабатывающая пром-сть, 2015. 230 с.
6. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Вернер Н.Н. Системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Актуальные направления науч. исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5, № 5 (31). С. 438-443.
7. Григорьева О.И., Макуев В.А., Барышникова Е.В., Бурмистрова О.Н., Швецова В.В., Григорьев И.В., Иванов В.А. Перспективы импортозамещения систем машин для искусственного лесовосстановления // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 3 (55). С. 78-84.
8. Григорьева О.И., Нгуен Ф.З. Лесные плантации для сырьевого обеспечения // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы третьей Всерос. науч.-практической конф. с междунар. участием (30 мая 2017 г.). Петрозаводск, 2017. С. 59-61.
9. Григорьев И.В., Рудов С.Е. Особенности эксплуатации колесных лесных машин в сложных почвенно-грунтовых и рельефных условиях // Forest Engineering: материалы науч.-практической конф. с междунар. участием (30-31 мая 2018 г.). Якутск, 2018. С. 67-71.
10. Добрецов Р.Ю., Григорьев И.В. Перспективные трансмиссии лесных гусеничных машин // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы IV Всерос. науч.-практической конф. с междунар. участием (22-23 мая 2018 г.). Петрозаводск, 2018. С. 57-58.
11. Григорьев И.В., Давтян А.Б., Григорьева О.И. Выбор системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Управление земельными ресурсами, землеустройство, кадастр, геодезия и картография. Проблемы и перспективы развития: сб. материалов Всерос. науч.-практической конф. с междунар. участием, посвящ. 255-летию Землеустройству Якутии и Году науки и технологий (26 февр. 2021 г.). Якутск, 2021. С. 271-278.
12. Рудов С.Е., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Эффективное восстановление лесов на вечной мерзлоте // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 86-й науч.-технической конф. проф.-препод. состава, науч. сотрудников и аспирантов (31 янв.-12 февр. 2022 г.). Минск, 2022. С. 38-41.
13. Гаспарян Г.Д., Давтян А.Б., Григорьев И.В., Марков О.Б., Григорьева О.И. Численное исследование показателей заготовки древесины на лесных плантациях // Resources and Technology. 2021. V. 18, № 4. Р. 17-45.
14. Давтян А.Б., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Энергетические лесные плантации для эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения в РФ // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 86-й науч.-технической конф. проф.-препод. состава, науч. сотрудников и аспирантов (31 янв.-12 февр. 2022 г.). Минск, 2022. С. 42-45.
15. Заикин А.Н., Макуев В.А. История оборудования для трелевки леса. Брянск: БГИТА, 2014. 111 с.
16. Григорьева О.И., Панарин А.О. Повышение эффективности ухода за лесом // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Девятой Всерос. нац. науч.-

Важно отметить, что для лесных почвогрунтов установлены зависимости, позволяющие приближенно рассчитать ω , C , φ , γ , G по величине модуля E . Приведем их согласно [22]:

$$C = 10,774E^{0,7737}, \quad (45)$$

$$\varphi = 13,669E^{0,1818}, \quad (46)$$

$$\gamma = 8,4008E^{0,1168}, \quad (47)$$

$$G = 2,4388E^{0,1161}, \quad (48)$$

$$\omega = 1,7880E^{1,9200} \quad (49)$$

Таким образом, обоснованы все необходимые зависимости и уравнения, позволяющие рассчитать комплекс параметров, определяющих основные показатели работы машины с комбинированным колесно-гусеничным движителем в заданных почвенно-грунтовых условиях эксплуатации.

Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование выполнено счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092/.

- практической конф. с междунар. участием (2 мая 2023 г.). Петрозаводск, 2023. С. 61-62.
17. Григорьева О.И., Панарин А.О. Перспективные пути повышения эффективности рубок ухода в молодняках // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: материалы Всерос. науч.-практической конф. (24-28 апр. 2023 г.). Казань, 2023. С. 70-73.
 18. Григорьева О.И. Перспективные направления повышения эффективности проведения рубок ухода за лесом // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы третьей Всерос. науч.-практической конф. с междунар. участием (30 мая 2017 г.). Петрозаводск, 2017. С. 56-58.
 19. Григорьева О.И., Нгуен Ф.З. Перспективная техника для проведения рубок ухода за лесом // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы науч.-технической конф. (13-15 апр. 2016 г.). СПб., 2016. С. 112-114.
 20. Григорьева О.И. Повышение эффективности проведения рубок ухода за лесом // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Второй Всерос. науч.-практической конф. с междунар. участием, посвящ. 65-летию высш. лесного образования в Республике Карелия (24 мая 2016 г.). Петрозаводск, 2016. С. 70-73.
 21. Григорьева О.И. Новая машина для очистки лесосек // Актуальные направления науч. исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 5-3 (10-3). С. 96-99.
 22. Хитров Е.Г. Комплексное обоснование параметров и режимов работы движителей лесных машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Воронеж, 2020. 319 с.
 23. Никифорова А.И., Григорьева О.И. Моделирование воздействия движителей лесных машин на почвы лесосек // Актуальные направления науч. исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 5-4 (16-4). С. 320-323.
 24. Рудов С.Е., Куницкая О.А., Григорьев И.В., Григорьева О.И., Каляшов В.А., Нгуен Т.Н. Современные системы машин для освоения лесосек на склонах // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2021. № 1. С. 35-42.
 25. Добрецов Р.Ю., Григорьев И.В., Иванов В.А. Увеличение подвижности гусеничных вездеходов для вахтовых лесозаготовок // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 2 (30). С. 114-119.
 26. Калистратов А.В., Григорьева О.И., Григорьев Г.В., Дмитриева И.Н. О важности исследований экологической эффективности процесса трелевки // Наука, образование, инновации в приграничном регионе: материалы республ. науч.-практической конф. (29 янв. 2015 г.). Петрозаводск, 2015. С. 7-9.
 27. Григорьев И.В., Григорьева О.И. Повышение экологической эффективности лесохозяйственного производства // Актуальные направления науч. исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 3-4 (8-4). С. 51-55.
 28. Хитров Е.Г., Григорьев И.В., Хахина А.М. Повышение эффективности трелевки обоснованием показателей работы лесных машин при оперативном контроле свойств почвогрунта: моногр. СПб., 2015. 146 с.
 29. Rudov S.E., Voronova A.M., Chemshikova J.M., Terevleva E.V., Kruchinin I.N., Dondokov Yu.Zh., Khaldeeva M.N., Burtseva I.A., Danilov V.V., Grigorev I.V. Theoretical approaches to logging trail network planning: increasing efficiency of forest machines and reducing their negative impact on soil and terrain // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2019. V. 16, № 4. P. 61-75.
 30. Dobretsov R., Grigorev I., Ivanov V., Zhuk A., Verner N., Grigorev G., Storodubtseva T.N., Dmitrieva N. Improvement of the forest tracked vehicles' control by using impulse control technology for the steering mechanism // European Chemical Bulletin. 2021. V. 10, № 1. P. 21-26.
 31. Dobretsov R., Grigorev I., Tikhonov E., Mikheev A., Khakhina A., Storodubtseva T., Shiryaev S., Burgonutdinov A. Impulse control technology for improving steering control systems of the tracked vehicles // International Review of Automatic Control. 2021. V. 14, № 3. P. 172-178.
 32. Khakhina A.M., Grigorev I.V., Dolmatov N.P., Makuev V.A., Kruchinin I.N., Storodubtseva T.N., Burgonutdinov A.M., Markov O.B. Predicting the passability of wheeled tractors // Mathematical Modelling of Engineering Problems. 2022. V. 9, № 5. P. 1233-1242.

References

1. Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I., CHurakov A.A. Effective technologies and machine systems for low-volume wood blanks // Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya. 2018. № 2. P. 61-66.
2. Grigor'ev I.V. Parameters and performance indicators of a promising forwarder for low-volume logging // Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice. 2018. V. 6, № 4 (40). P. 21-25.
3. Grigor'ev I.V. Improving the efficiency of the development of a low-concentration logging fund // Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy Vtoroj Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem, posvyashch. 65-letiyu vyssh. lesnogo obrazovaniya v Respublike Kareliya (24 maya 2016 g.). Petrozavodsk, 2016. P. 62-65.
4. Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I., Nguen F.Z. Machine system and work technology for low-volume logging // Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy tret'ej Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem (30 maya 2017 g.). Petrozavodsk, 2017. P. 51-53.
5. Safin R.R., Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I., Razumov E.YU. Technology and machines of reforestation. M.: Derevoobrabatyvayushchaya prom-st', 2015. 230 p.
6. Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I., Verner N.N. Systems of machines for the creation and operation of forest plantations // Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice. 2017. V. 5, № 5 (31). P. 438-443.
7. Grigor'eva O.I., Makuev V.A., Baryshnikova E.V., Burmistrova O.N., SHvecova V.V., Grigor'ev I.V., Ivanov V.A. Prospects for import substitution of machine systems for artificial reforestation // Systems. Methods. Technologies. 2022. № 3 (55). P. 78-84.
8. Grigor'eva O.I., Nguen F.Z. Forest plantations for raw materials supply // Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy tret'ej Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem (30 maya 2017 g.). Petrozavodsk, 2017. P. 59-61.
9. Grigor'ev I.V., Rudov S.E. Features of operation of wheeled forest machines in difficult soil-soil and relief conditions // Forest Engineering: materialy nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem (30-31 maya 2018 g.). YAkutsk, 2018. P. 67-71.
10. Dobrecov R.YU., Grigor'ev I.V. Perspective transmissions of forest tracked vehicles // Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy IV Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem (22-23 maya 2018 g.). Petrozavodsk, 2018. P. 57-58.
11. Grigor'ev I.V., Davtyan A.B., Grigor'eva O.I. The choice of a machine system for the creation and operation of forest plantations // Upravlenie zemel'nymi resursami, zemleustrojstvo, kadastr, geodeziya i kartografiya. Problemy i perspektivy razvitiya: sb. materialov Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem, posvyashch. 255-letiyu Zemleustroystvu YAkutii i Godu nauki i tekhnologij (26 fevr. 2021 g.). YAkutsk, 2021. P. 271-278.
12. Rudov S.E., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V. Effective restoration of forests on permafrost // Lesnaya inzheneriya, materialovedenie i dizajn: materialy 86-j nauch.-tekhnicheskoy konf. prof.-prepod. sostava, nauch. sotrudnikov i aspirantov (31 yanv.-12 fevr. 2022 g.). Minsk, 2022. P. 38-41.

13. Gasparyan G.D., Davtyan A.B., Grigor'ev I.V., Markov O.B., Grigor'eva O.I. Numerical study of wood harvesting indicators on forest plantations // *Resources and Technology*. 2021. V. 18, № 4. P. 17-45.
14. Davtyan A.B., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V. Energy forest plantations for effective involvement in the turnover of agricultural land in the Russian Federation // *Lesnaya inzheneriya, materialovedenie i dizajn: materialy 86-j nauch.-tekhnicheskoy konf. prof.-prepod. sostava, nauch. sotrudnikov i aspirantov* (31 yanv.-12 fevr. 2022 g.). Minsk, 2022. P. 42-45.
15. Zaikin A.N., Makuev V.A. History of equipment for forest skidding. Bryansk: BGITA, 2014. 111 p.
16. Grigor'eva O.I., Panarin A.O. Improving the efficiency of forest care // *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy Devyatoj Vseros. nac. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem* (2 maya 2023 g.). Petrozavodsk, 2023. P. 61-62.
17. Grigor'eva O.I., Panarin A.O. Promising ways to improve the efficiency of logging care in young trees // *Aktual'nye problemy lesnogo hozyajstva i derevopererabotki: materialy Vseros. nauch.-prakticheskoy konf.* (24-28 apr. 2023 g.). Kazan', 2023. P. 70-73.
18. Grigor'eva O.I. Promising directions for improving the efficiency of logging of forest care // *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy tret'ej Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem* (30 maya 2017 g.). Petrozavodsk, 2017. P. 56-58.
19. Grigor'eva O.I., Nguen F.Z. Promising equipment for logging of forest care // *Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie: materialy nauch.-tekhnicheskoy konf.* (13-15 apr. 2016 g.). SPb., 2016. P. 112-114.
20. Grigor'eva O.I. Improving the efficiency of logging of forest care // *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy Vtoroj Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem, posvyashch. 65-letiyu vyssh. lesnogo obrazovaniya v Respublike Kareliya* (24 maya 2016 g.). Petrozavodsk, 2016. P. 70-73.
21. Grigor'eva O.I. A new machine for clearing cutting areas // *Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice*. 2014. V. 2, № 5-3 (10-3). P. 96-99.
22. Hitrov E.G. Comprehensive justification of parameters and modes of operation of propellers of forest machines: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.21.01. Voronezh, 2020. 319 p.
23. Nikiforova A.I., Grigor'eva O.I. Modeling of the impact of forest machinery movers on the soils of logging areas // *Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice*. 2015. V. 3, № 5-4 (16-4). P. 320-323.
24. Rudov S.E., Kunickaya O.A., Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I., Kalyashov V.A., Nguen T.N. Modern systems of machines for the development of cutting areas on slopes // *Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya (Repair, Reconditioning, Modernization)*. 2021. № 1. P. 35-42.
25. Dobrecov R.YU., Grigor'ev I.V., Ivanov V.A. Increasing the mobility of tracked all-terrain vehicles for shift logging // *Systems. Methods. Technologies*. 2016. № 2 (30). P. 114-119.
26. Kalistratov A.V., Grigor'eva O.I., Grigor'ev G.V., Dmitrieva I.N. On the importance of research on the environmental efficiency of the skidding process // *Nauka, obrazovanie, innovacii v prigranichnom regione: materialy respubl. nauch.-prakticheskoy konf.* (29 yanv. 2015 g.). Petrozavodsk, 2015. P. 7-9.
27. Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I. Improving the environmental efficiency of forestry production // *Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice*. 2014. V. 2, № 3-4 (8-4). P. 51-55.
28. Hitrov E.G., Grigor'ev I.V., Hahina A.M. Improving the efficiency of skidding by substantiating the performance of forest machines during operational control of soil properties: monogr. SPb., 2015. 146 p.
29. Rudov S.E., Voronova A.M., Chemshikova J.M., Terevleva E.V., Kruchinin I.N., Dondokov Yu.Zh., Khaldeeva M.N., Burtseva I.A., Danilov V.V., Grigorev I.V. Theoretical approaches to logging trail network planning: increasing efficiency of forest machines and reducing their negative impact on soil and terrain // *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. 2019. V. 16, № 4. P. 61-75.
30. Dobretsov R., Grigorev I., Ivanov V., Zhuk A., Verner N., Grigorev G., Storodubtseva T.N., Dmitrieva N. Improvement of the forest tracked vehicles' control by using impulse control technology for the steering mechanism // *European Chemical Bulletin*. 2021. V. 10, № 1. P. 21-26.
31. Dobretsov R., Grigorev I., Tikhonov E., Mikheev A., Khakhina A., Storodubtseva T., Shiryaev S., Burgonutdinov A. Impulse control technology for improving steering control systems of the tracked vehicles // *International Review of Automatic Control*. 2021. V. 14, № 3. P. 172-178.
32. Khakhina A.M., Grigorev I.V., Dolmatov N.P., Makuev V.A., Kruchinin I.N., Storodubtseva T.N., Burgonutdinov A.M., Markov O.B. Predicting the passability of wheeled tractors // *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2022. V. 9, № 5. P. 1233-1242.