



УДК 630*372/375

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-101-116

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ФОРВАРДЕРОВ ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОЧВОГРУНТЫ

О.Н. Бурмистрова¹, д-р техн. наук, проф.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2616-7557>

А.А. Просужих¹, ст. преп.; ResearcherID: [AAJ-2312-2020](https://orcid.org/0000-0003-1968-3713),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1968-3713>

Е.Г. Хитров², канд. техн. наук; ResearcherID: [R-8199-2016](https://orcid.org/0000-0003-4569-9508),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>

О.А. Куницкая³, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-9568-2020](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

Е.Н. Лулева⁴, канд. с.-х. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4363-5746>

¹Ухтинский государственный технический университет, ул. Первомайская, д. 13, г. Ухта, Республика Коми, Россия, 169300; e-mail: olga.burm@mail.ru

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251; e-mail: yegorkhitrov@gmail.com

³Арктический государственный агротехнологический университет, 3-й км, д. 3, ш. Сергеляхское, г. Якутск, Республика Якутия, Россия, 677007; e-mail: ola.ola07@mail.ru

⁴Донской государственный аграрный университет, ул. Кривошлыкова, д. 24, пос. Персиановский, Октябрьский район, Ростовская область, Россия, 346493; e-mail: hizz90@yandex.ru

Аннотация. Колесные лесные машины в настоящее время доминируют в лесозаготовительном производстве в России и в мире. Ежегодно в нашей стране увеличивается доля машинной заготовки древесины по скандинавской технологии, предусматривающей выполнение валки деревьев, их очистки от сучьев и раскряжевки прямо на пасеке. Так работают не только классические двухмашинные комплексы, состоящие из харвестера и форвардера, но и трехмашинные (в ряде регионов Сибири), включающие валочно-пакетирующий агрегат, работающий на пасеке процессор и форвардер для трелевки получаемых сотиментов. Проблема повышения эффективности работы форвардеров актуальна для лесопромышленного комплекса. Ее решение возможно на основе оценки проектных решений с использованием современных средств моделирования и оптимизации процессов на стадии разработки. Такой подход требует глубоких теоретических и экспериментальных исследований, представляет большой научный и практический интерес. При определении максимального объема трелеваемой древесины учитывают следующие ограничения машины: по грузоподъемности; по касательной силе тяги; по сцеплению движителя с грунтом (касательная сила тяги не должна превышать силу сцепления движителя с поверхностью движения – почвогрунтом лесосеки). Кроме того, известны рекомендации по ограничению веса трелевочной машины с грузом исходя из допустимой глубины колеи после первого прохода машины, считается, что этот показатель не должен превышать 20 см. Данное утверждение подкрепляется

результатами исследований развития колеи при циклическом воздействии со стороны колесного движителя (т. е. при многократном прохождении машиной одного и того же участка волока). В этой связи возникает вопрос о производительности форвардеров при выполнении операции трелевки с учетом ограничения по глубине колеи.

Для цитирования: Бурмистрова О.Н., Просужих А.А., Хитров Е.Г., Куницкая О.А., Лунева Е.Н. Теоретические исследования производительности форвардеров при ограничениях воздействия на почвогрунты // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 101–116. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-101-116

Ключевые слова: лесозаготовка, производительность форвардеров, трелевочная система, почвогрунты.

Введение

В настоящее время подавляющий объем заготовленной древесины в России вытрелевывается на погрузочные пункты форвардерами, практически 100 % которых имеют колесный движитель. На их производительность первоочередное влияние оказывают расстояние трелевки и проходимость, зависящая от состояния поверхности движения [4, 5]. Производительность лесных машин зависит от множества факторов, относящихся к природным и производственным условиям [3, 6–9, 11]. Их изменчивость и вариативность во многом определяют сложность теоретической оценки показателей работы машин [21, 23–25, 27]. На территории лесного фонда Российской Федерации преобладают почвогрунты III и IV категории, которые в теплый период года существенно теряют несущую способность из-за переувлажнения [1]. Причем за последние годы процессы потепления климата привели к значительному уменьшению периода, когда почвогрунты находятся в замерзшем состоянии и зимняя вывозка заготовленной древесины устойчива, а значит, и период эффективной трелевки стал короче. При обосновании режимов и показателей работы форвардеров необходимо учитывать и негативные экологические факторы их работы, которые выражаются в замедлении лесовосстановительных процессов, проявлении признаков водной эрозии на трелевочных волоках, угнетении корней, замедлении роста, ослаблении оставляемых на доразживание деревьев вблизи трасс движения. В настоящее время ведущие позиции в исследуемом вопросе занимает научная школа «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета.

Подробный расчет составляющих затрат времени на цикл трелевки не всегда целесообразен. Например, затраты времени, связанные с работой манипулятора, будут зависеть как от скорости манипулятора, так и от действий оператора и пространственного расположения лесоматериалов [5, 7]. По этим причинам будем ориентироваться на вероятностный подход и имитационное моделирование при расчете производительности форвардера. Логически разделим исследование на этапы:

формулирование в общем виде математической модели для прогнозирования производительности форвардера с учетом его эксплуатационных характеристик, параметров лесосеки и физико-механических свойств почвогрунта; выделение основных составляющих затрат времени на выполнение отдельных операций цикла трелевки;

аналитическое определение допустимых режимов работы форвардера (скорость, объем трелюемой древесины), исходя из эксплуатационных характеристик и почвенно-грунтовых условий;

прогнозирование общего вида регрессионных зависимостей, объясняющих с достаточной точностью влияние основных факторов на затраты времени по отдельным операциям, и доверительных границ варьирования коэффициентов регрессионных зависимостей;

реализация математической модели с подстановкой значений коэффициентов уравнений регрессии в пределах установленных доверительных границ варьирования (имитационный подход).

Цель исследования заключается в разработке математической модели для прогнозирования производительности форвардера с учетом его эксплуатационных характеристик, параметров лесосеки и физико-механических свойств почвогрунта, аналитическом определении допустимых режимов работы форвардера и общего вида регрессионных зависимостей, объясняющих с достаточной точностью влияние основных факторов на затраты времени по отдельным операциям.

Объекты и методы исследования

Часовую производительность форвардера определим по формуле [7]:

$$\Pi = \frac{3600V}{T}, \quad (1)$$

где V – объем трелюемых лесоматериалов; T – время цикла трелевки.

Объем трелюемых лесоматериалов ограничен грузоподъемностью форвардера:

$$V \leq \frac{L}{\rho}, \quad (2)$$

где L – грузоподъемность форвардера; ρ – среднее значение плотности трелюемой древесины,

а также нагрузкой со стороны движителя на грунт [2, 10, 14, 26, 28].

Анализ данных, предоставленных производителями форвардеров Ponsse, John Deere, Komatsu и др., показывает, что грузоподъемность машины связана с ее массой соотношением (рис. 1):

$$L = a_0 + a_1 M - 4,1728 + 1,015M, \quad (3)$$

где M – масса форвардера.

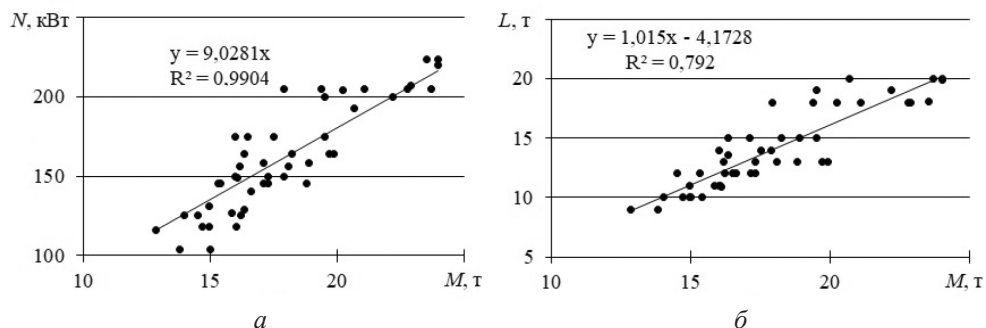


Рис. 1. Зависимость грузоподъемности (а) и мощности двигателя (б) форвардера от его массы

Fig. 1. Dependence of bearing capacity (a) and engine power (b) of a forwarder on its weight

Кроме того, существует связь мощности двигателя и массы машины (рис. 1, б):

$$N = b_1 M = 9,0281M. \quad (4)$$

Результаты анализа статистических данных также представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты анализа статистических данных о связи массы форвардера, его грузоподъемности и мощности двигателя

Коэффициент	Оценка	Стандартная ошибка	t-критерий
a_0	-4,17277	1,4088700	-2,96178
a_1	1,01501	0,0775335	13,09120
b_1	9,02810	0,1307430	69,05230

Стандартные ошибки определения коэффициентов уравнений (3), (4) будут использованы при реализации разрабатываемой математической модели, предназначенной для прогнозирования производительности форвардерной трелевки.

Результаты исследования и их обсуждение

Исходя из ограничения (2):

$$P \leq P_{adm}; \quad (5)$$

$$\frac{G_0 + G}{2k} \leq P_{adm}; \quad (6)$$

$$\frac{g(M + \rho V)}{2k} \leq P_{adm}; \quad (7)$$

$$V \leq \frac{2kP_{adm} - Mg}{\rho g}, \quad (8)$$

где P и P_{adm} – нагрузка и допустимая нагрузка на грунт со стороны движителя; G_0 – вес форвардера; G – вес трелеваемых лесоматериалов; k – число осей форвардера; g – ускорение свободного падения.

Таким образом, объем трелеваемых лесоматериалов определим по условию

$$V = \min \left\{ \frac{L}{\rho}; \frac{2kP_{adm} - Mg}{\rho g} \right\}. \quad (9)$$

Допустимая нагрузка на грунт P_{adm} зависит от свойств почвогрунта и будет исследована в дальнейшем.

Время цикла трелевки найдем по формуле [22]:

$$T = \varphi_0 \left[l_{п.в} \left(\frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2} \right) + l_{м.в} \left(\frac{1}{v_3} + \frac{1}{v_4} \right) + t_{загр} + t_{разгр} \right], \quad (10)$$

где φ_0 – поправочный коэффициент, учитывающий увеличение времени цикла трелевки в связи с простоями машины; $l_{п.в}$ – длина пасечного волока (среднее значение); $l_{м.в}$ – длина магистрального волока (среднее значение); v_1, v_2 – скорость порожнего и груженого форвардера при движении по пасечному волоку; v_3, v_4 – скорость порожнего и груженого форвардера при движении по маги-

стральному волоку; $t_{\text{загр}}$ – время загрузки сортиментов в кузов; $t_{\text{разгр}}$ – время разгрузки кузова.

Скорости v_i ограничены как соотношением мощности двигателя форвардера N и силы сопротивления движению машины, так и технологическими соображениями, связанными с безопасностью маневрирования машины в условиях бездорожья. Ограничение по мощности двигателя запишем так [15]:

$$v_i = \frac{N\eta}{F_i}, \quad (11)$$

где η – КПД трансмиссии, F_i – сила сопротивления движению на i -м участке.

Следовательно, для форвардера

$$v_i = \min \left\{ \frac{N\eta}{F_i}; v_{i,\text{техн}} \right\}. \quad (12)$$

Согласно экспериментальным данным [20], время загрузки кузова складывается из двух основных составляющих:

$$t_{\text{загр}} = t_{\text{загр1}} + t_{\text{загр2}}, \quad (13)$$

где $t_{\text{загр1}}$ – время, затрачиваемое на работу манипулятора форвардера при загрузке кузова; $t_{\text{загр2}}$ – время, затрачиваемое на маневры форвардера при загрузке кузова, причем [7]:

$$t_{\text{загр1}} = t_{\text{загр1}}(V, n); \quad (14)$$

$$t_{\text{загр2}} = t_{\text{загр2}}(V, q), \quad (15)$$

n – число сортиментов, укладываемых в кузов; q – запас древесины на единицу площади лесосеки.

Число сортиментов, укладываемых в кузов, будет являться функцией объема лесоматериалов, трелюемых за рейс, а также среднего объема сортимента [7]:

$$n = n(V, V_{\text{сорт}}), \quad (16)$$

где средний объем сортимента $V_{\text{сорт}}$ связан со средним объемом хлыста и типом заготавливаемых лесоматериалов:

$$V_{\text{сорт}} = V_{\text{сорт}}(V_x), \quad (17)$$

V_x – средний объем хлыста.

Время разгрузки кузова также можно представить как сумму двух основных составляющих:

$$t_{\text{разгр}} = t_{\text{разгр1}} + t_{\text{разгр2}}, \quad (18)$$

где $t_{\text{разгр1}}$ – время, затрачиваемое на работу манипулятора форвардера при разгрузке кузова; $t_{\text{разгр2}}$ – время, затрачиваемое на маневры форвардера при разгрузке кузова, причем:

$$t_{\text{разгр1}} = t_{\text{разгр1}}(V, n); \quad (19)$$

$$t_{\text{разгр2}} = t_{\text{разгр2}}(V). \quad (20)$$

Параметры M , q , ρ , V_x , $l_{\text{п.в}}$, $l_{\text{м.в}}$ в разрабатываемой модели будут являться управляемыми. Значение V определим аналитически на основе (9) с учетом L и физико-механических свойств почвогрунта; скорости v_i по (12) оценим при помощи аналитического выражения для F_i и N . Вид функции (15)–(17), (20), оценки и стандартные ошибки определения коэффициентов найдем с использовани-

ем экспериментальных данных. В результате получим имитационную модель, прогнозирующую производительность форвардерной трелевки в зависимости от эксплуатационных характеристик машины и природно-производственных условий.

При исследовании показателей взаимодействия движителей машин с почвогрунтами успешно применяется подход, основанный на использовании различных моделей вдавливания штампов-инденторов в деформируемую среду. Например, известны работы, в которых рассматривается сжатие элементарных слоев упругого полупространства штампом определенной формы [12, 13, 16, 18]. Расхождение теоретических оценок с практикой, вызванное допущением об упругости деформируемого почвогрунта, устраняется за счет введения в модели поправочных коэффициентов, учитывающих потерю им несущей способности [17]. Подобный подход стал значимым для исследования опорной проходимости и экологичности лесных машин [2, 10], однако до недавнего времени в рамках него практически не рассматривались вопросы, связанные с моделированием поворота машин. Реализация метода, использующего нелинейные уравнения, не имеющие аналитических решений, требует дальнейших вычислительных экспериментов.

Также напряжения и деформации почвогрунта под воздействием движителя машины могут рассматриваться на основе решения задачи Буссинеска о вдавливании сферического индентора в упругое полупространство [2, 10, 15, 17, 19]. Этот подход успешно использован при моделировании уплотнения почвогрунтов лесосек как непосредственно под движителем, так и в боковых полосах трелевочных волоков [15]. Здесь применяются аналитические решения теории упругости, учет потери несущей способности возможен посредством замены пределов прочности при сжатии пределами прочности почвогрунта при сдвиге. Учтем эти теоретические положения при разработке нашей модели. Сформулируем базовые уравнения для расчета напряжений в почвогрунте. Моделью движителя является сферический штамп (рис. 2).

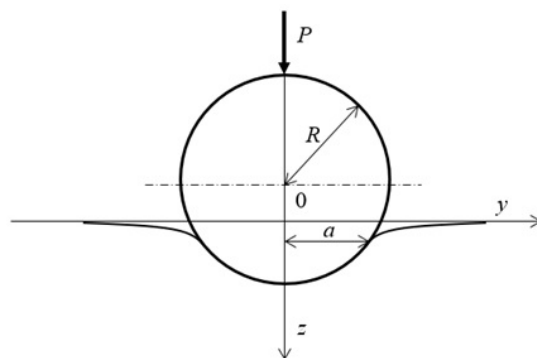


Рис. 2. Схема к решению задачи Буссинеска о вдавливании сферического штампа в полупространство

Fig. 2. Scheme for solving the Boussinesq problem of pressing a spherical die into a half-space

В этом случае напряжения по осям z , y удобно выразить функциями [20]:

$$\sigma_z = q_a \Psi_z ; \quad (21)$$

$$\sigma_y = q_a \Psi_y ; \quad (22)$$

$$\tau_{yz} = q_a \Psi_{yz} ; \quad (23)$$

где q_a – среднее давление по плоскости контакта [2],

$$q_a = \frac{P}{\pi a^2}, \quad (24)$$

P – сила, прикладываемая со стороны штампа; a – радиус пятна контакта (рис. 2).

Значение a находим по [10]:

$$a = \left[\frac{3PR(1-\mu)^2}{4E} \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (25)$$

где R – радиус штампа (приблизительно равен радиусу колеса); μ – коэффициент Пуассона почвогрунта; E – модуль упругости почвогрунта.

Точные выражения для функций ψ приводятся в [20]:

$$\psi_z = -\left(\frac{z}{\sqrt{u}} \right)^3 \frac{a^2 u}{u^2 + a^2 z^2}; \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \psi_y = & \frac{1-2\mu}{3} \frac{a^2}{r^2} \left[1 - \left(\frac{z}{\sqrt{u}} \right)^3 \right] + \left(\frac{z}{\sqrt{u}} \right)^3 \frac{a^2 u}{u^2 + a^2 z^2} + \\ & + \frac{z}{\sqrt{u}} \left[\frac{(1-\mu)u}{a^2 + u} + (1+\mu) \frac{\sqrt{u}}{a} \operatorname{arctg} \frac{a}{\sqrt{u}} - 2 \right]; \end{aligned} \quad (27)$$

$$\psi_{yz} = -\frac{(r^2 + z^2)z^2}{u^2 + a^2 z^2} \frac{a^2 \sqrt{u}}{a^2 + u}, \quad (28)$$

где z – вертикальная координата; u, r – геометрические параметры, определяемые соответственно по [14] и [20],

$$u = -\frac{a^2}{2} + \frac{r^2}{2} + \frac{z^2}{2} + \frac{\sqrt{a^4 - 2a^2 r^2 + 2a^2 z^2 + r^4 + 2r^2 z^2 + z^4}}{2}; \quad (29)$$

$$r = \sqrt{z^2 + y^2}, \quad (30)$$

где y – горизонтальная координата (рис. 2).

Дополнительное касательное напряжение, вызываемое поворотом движителя, определим по формуле [2]:

$$\tau_\theta = \frac{(\sigma_z - \sigma_y) \sin 2\theta}{2}, \quad (31)$$

где θ – угол поворота движителя.

Тогда суммарное касательное напряжение можем найти по уравнению [10]:

$$\tau_s = \tau_\theta + \tau_{yz}. \quad (32)$$

Анализ зависимостей (21)–(32) показывает, что они включают в себя параметры грунта E, μ и движителя R, θ, P , причем напряжения σ, τ можно определить для точек с произвольными координатами z, r (либо y). Таким образом, сопоставляя напряжения σ, τ с пределами прочности почвогрунта, установим глубину залегания «опасных» сечений массива почвогрунта, по которой оценим глубину колеи h , в том числе с учетом поворота движителя на угол θ . Сечения можем найти как решения уравнений:

$$\sigma_z = p_z, \quad (33)$$

$$\tau_s = \tau_{adm}, \quad (34)$$

где p_z – несущая способность лесного грунта; τ_{adm} – предел прочности лесного грунта на срез, рассчитывается по формуле [15]:

$$\tau_{adm} = \sigma_z \operatorname{tg} \varphi + C \left(1 - \frac{SR}{t_{gr}} \right), \quad (35)$$

φ – угол внутреннего трения лесного почвогрунта; C – удельное сцепление лесного почвогрунта; S – коэффициент технического буксования движителя; t_{gr} – шаг грунтозацепов; множитель $1 - \frac{SR}{t_{gr}}$ вводится с целью учесть ослабление почвогрунта на срез, вызываемое сдвиговой деформацией.

Далее по зависимости $P(h)$ определим силу сопротивления прямолинейному движению и повороту движителя.

Физико-механические свойства лесного грунта примем в соответствии с табл. 2 [15].

Таблица 2

Физико-механические свойства лесного почвогрунта [15]

Категория лесного грунта	E , МПа	μ	p_z , МПа	C , МПа	φ, \dots°
III (слабый)	0,4	0,15	0,0504	0,005	11
II (средней прочности)	1,0	0,25	0,1170	0,012	15
I (прочный)	3,0	0,35	0,2870	0,024	16

Приведем численные примеры расчета по представленным зависимостям. Здесь и далее, если не отмечено отдельно, иллюстрации выполнены для результатов расчетов при $R = 1,333/2$ м, $P = 0,045$ МН, $S = 0,05$, $t_{gr} = 0,14$ м, лесной почвогрунт II категории.

На рис. 3 приведены графики для трех функций напряжений по выражениям (26)–(28) при $y \rightarrow 0$.

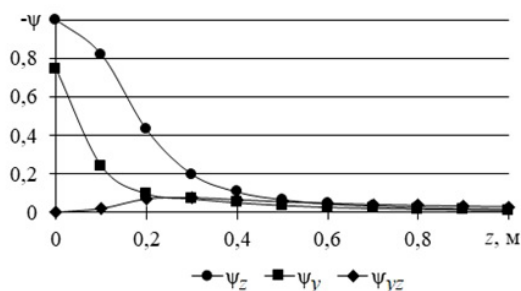


Рис. 3. Функции для расчета напряжений в массиве почвогрунта

Fig. 3. Functions for calculating stresses in a soil mass

Анализ графиков показывает, что нормальное сжимающее напряжение по оси z превышает сжимающее напряжение по оси y . Оба нормальных напряжения выше касательного τ_{zy} .

В данном случае $\sigma_z > \sigma_y$ и при иных значениях координаты y , что подтверждается расчетами и графиками, представленными на рис. 4, 5.

Рис. 4. Функция для расчета нормального напряжения в массиве почвогрунта по оси z (воздействие движителя на грунт по вертикали)

Fig. 4. Function for calculating the normal stress in the soil mass along the z -axis (vertical impact of the mover on the soil)

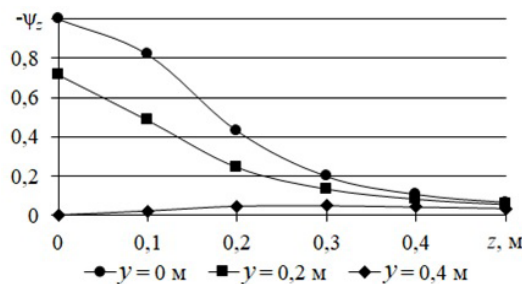
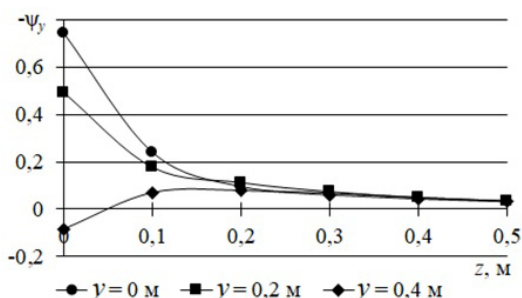


Рис 5. Функция для расчета нормального напряжения в массиве почвогрунта по оси y (боковое воздействие движителя на грунт)

Fig. 5. Function for calculating the normal stress in the soil mass along the y -axis (lateral impact of the mover on the soil)

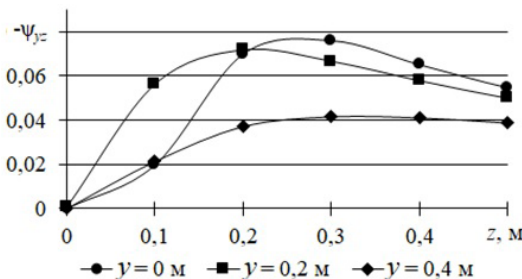


При сравнительно небольших значениях $z < 0,05$ м напряжение σ_y может становиться растягивающим при $y > 0,2$ м, однако его значение по абсолютной величине практически на порядок ниже абсолютного значения напряжения σ_z под штампом. Сравнительно небольшая глубина залегания слоев почвогрунта, в которых возникает растягивающее напряжение по нормали, позволяет пренебречь им при расчете глубины колеи.

На рис. 6 представлены функции к расчету распределения касательного напряжения τ_{yz} .

Рис. 6. Функция для расчета касательного напряжения в массиве почвогрунта по нормали к вертикальной оси z (без учета поворота движителя)

Fig. 6. Function for calculating the tangential stress in the soil mass along the normal to the vertical z -axis (regardless of mover rotation)



Обратим внимание, что для абсолютного значения касательного напряжения характерны точки максимума, причем на глубине большей, чем глубина залегания слоев грунта, в которых возникает растягивающее нормальное напряжение σ_y . Это подтверждает сделанное выше допущение о сравнительно малом влиянии растягивающего напряжения на формирование колеи.

Сопоставим расчетные значения напряжений σ_z , τ_s с пределами прочности p_z и τ_{adm} . На рис. 7 представлены графики, иллюстрирующие распространение напряжений при $\theta = 5^\circ$.

Как следует из расчетов, в данном случае сжимающее напряжение σ_z сравняется с несущей способностью грунта p_z при $z \approx 0,15$ м и глубина колеи h_0 , образовавшейся под воздействием нормальной нагрузки, составит примерно 0,15 м. При этом касательное напряжение τ_s превысит предел прочности τ_{adm} при

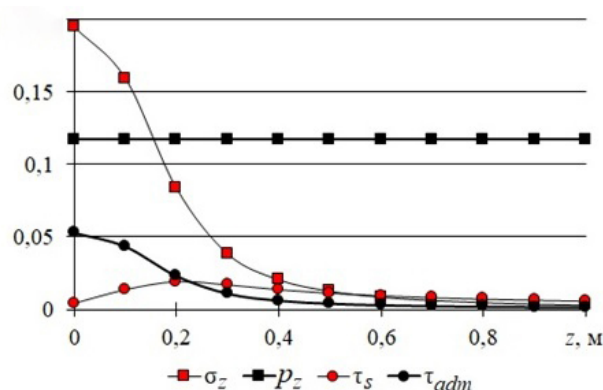


Рис. 7. Распространение напряжений, МПа, в лесном грунте при повороте движителя на угол $\theta = 5^\circ$

Fig. 7. Propagation of stresses in the forest soil when the mover is rotated by an angle of $\theta = 5^\circ$

$z \approx 0,22$ м, что приведет к разрушению грунтового массива за счет среза, следовательно, фактическая глубина колеи h составит не менее 0,22 м.

Обработка аналитических данных, полученных при варьировании свойств лесного грунта в пределах, указанных в табл. 2, в широком диапазоне изменения нагрузки P (0,025...0,055 МН) показывает, что для случая воздействия форвардера на лесной грунт можно предложить функцию, с высокой точностью аппроксимирующую итоги расчетов:

$$h_0 = 1,27 \left(\frac{P}{E} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (36)$$

где $P = 0,025-0,055$ МН; $E = 0,4-3,0$ МПа.

На рис. 8 представлены результаты вычисления фактической глубины колеи с учетом варьирования угла поворота движителя форвардера.

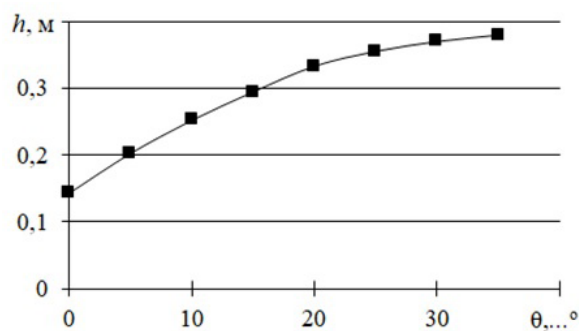


Рис. 8. Результаты расчета глубины колеи при варьировании угла поворота движителя

Fig. 8. Results of calculating the track depth when varying the angle of rotation of the mover

Анализ полученных данных показывает (рис. 9), что соотношение глубины колеи h при определенном угле θ и глубины колеи без учета поворота движителя практически функционально точно описывается полиномом:

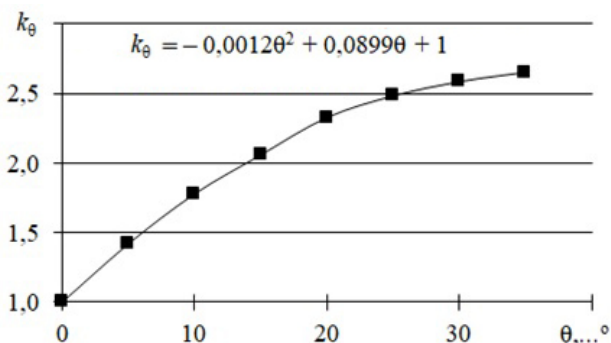
$$k_\theta = 1 + 0,0899\theta - 0,0012\theta^2. \quad (37)$$

Таким образом, на основе формул (36), (37) получим многопараметрическую функцию для оценки глубины колеи с учетом маневрирования форвардера:

$$h = 1,27 \left(\frac{P}{E} \right)^{\frac{2}{3}} (1 + 0,0899\theta - 0,0012\theta^2). \quad (38)$$

Рис. 9. Соотношение глубины колеи с учетом угла поворота движителя и глубины колеи при прямолинейном движении

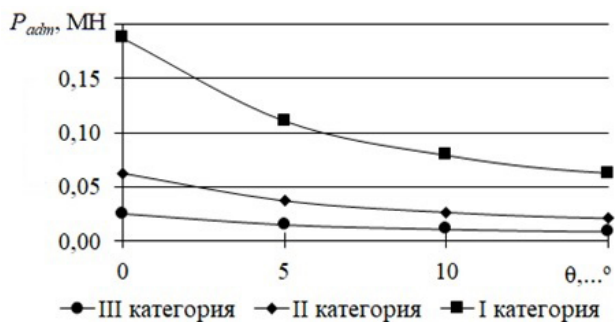
Fig. 9. The ratio of the track depth, taking into account the angle of rotation of the mover and the track depth in straight-line motion



Сформулируем рекомендации по подбору допустимой нагрузки на колесо форвардера при ограничении глубины колеи. Примем $h_{adm} = 0,2$ м, тогда на основе формулы (38) вычислим значения P , при которых глубина колеи не превысит максимальную величину при варьировании E , θ . Результаты расчетов представлены на рис. 10.

Рис. 10. Допустимая нагрузка на колесо форвардера, МН, в зависимости от категории грунта и угла поворота движителя

Fig. 10. Permissible load on the forwarder wheel, MN, depending on the soil category and the angle of rotation of the mover



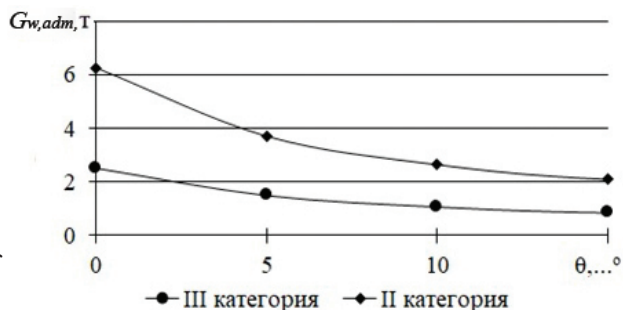
В общем случае, задаваясь допустимым значением h_{adm} , нагрузку P_{adm} найдем по уравнению

$$P_{adm} = \left[\frac{h_{adm} E}{1,27(1 + 0,0899\theta - 0,0012\theta^2)} \right]^{\frac{3}{2}}. \quad (39)$$

Результаты расчета по формуле (39) показаны на рис. 10; в пересчете на допустимую массу $G_{w,adm}$, приведенную к единичному движителю, – на рис. 11.

Рис. 11. Допустимая нагрузка на колесо форвардера, т, в зависимости от категории грунта и угла поворота движителя

Fig. 11. Permissible load on the forwarder wheel, t, depending on the soil category and the angle of rotation of the mover



Заключение

В общем виде производительность форвардерной трелевки оценивается при помощи математической модели, представленной формулами (1), (3), (4), (9), (10), (12)–(20). Управляемыми параметрами здесь являются масса форвардера, запас древесины на единицу площади, средний объем хлыста, плотность древесины, длины пасечных и магистральных волоков, модуль деформации почвогрунта и допустимая глубина колеи. Рейсовая нагрузка форвардера будет величиной, производной от его грузоподъемности (определяемой по статистической зависимости на основе массы машины) и максимальной нагрузки на колесо, которая находится аналитически в зависимости от свойств грунта и допустимой глубины колеи.

Моделирование напряжения и деформации грунта под воздействием движителя машины рассмотрено на основе решения задачи Буссинеска о вдавливании сферического индентора в упругое полупространство. Установлено, что лесные почвогрунты имеют смешанный характер образования колеи; на нее влияют деформации сжатия и сдвиг слоев почвогрунта. Обработка расчетных данных, полученных при варьировании свойств лесного грунта и нагрузки на колесо, показала, что степенная функция (36) с высокой точностью описывает формирование колеи.

Дальнейшее исследование решения задачи Буссинеска выявило, что учет дополнительных касательных напряжений и деформаций сдвига почвогрунта при повороте движителя возможен путем введения в функцию (38) поправочного коэффициента, учитывающего угол поворота (формула (36)). Для практических расчетов максимальной нагрузки на колесо при заданном допустимом значении глубины колеи получена многопараметрическая функция (39).

Определение общего вида регрессионных зависимостей, объясняющих с достаточной точностью влияние основных факторов на затраты времени по отдельным операциям, а также установление доверительных границ варьирования коэффициентов регрессионных зависимостей остаются задачами экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абузов А.В., Григорьев И.В. Конструктивные особенности канатных лесотранспортных систем на мягких пневматических опорах // Лесотехн. журн. 2020. Т. 10, № 1(37). С. 86–95.

Abuzov A.V., Grigoryev I.V. Design Features of Cable Forestry Systems on Soft Pneumatic Supports. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2020, vol. 10, no. 1(37), pp. 86–95. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.1/9>

2. Божбов В.Е., Григорьев И.В., Рудов С.Е., Тетеревлева Е.В., Чемшикова Ю.М. Анализ подходов к описанию процессов взаимодействия движителей лесных машин с почвогрунтами лесосек // Resources and Technology. 2019. Т. 16, № 2. С. 13–35.

Bozhbov V.E., Grigorev I.V., Rudov S.E., Teterlevleva E.V., Chemshikova Yu.M. Analysis of Approaches to the Description of Processes of Interaction of the Propulsion of Forest Machines with the Soil on the Cutting Area. *Resources and Technology*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 13–35. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2019.4482>

3. Воронов Р.В., Марков О.Б., Григорьев И.В., Давтян А.Б. Математическая модель модульного принципа подбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 5. С. 125–134.

Voronov R.V., Markov O.B., Grigorev I.V., Davtyan A.B. Mathematical Model of the Modular Approach for Selection of a System of Machines for Creation and Operation of Forest Plantations. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 125–134. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.125>

4. Григорьев И.В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных трелевочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: СПбГЛТА, 2006. 236 с.

Grigorev I.V. *Reduction of the Negative Effect from Wheeled Skidders on Soils by Substantiation of Modes of Their Movement and Technological Equipment*. Saint Petersburg, SPbSFTU Publ., 2006. 236 p.

5. Григорьев И.В. Параметры и показатели работы перспективного форвардера для малообъемных лесозаготовок // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6, № 4(40). С. 21–25.

Grigorev I.V. The Parameters and Indicators of Promising Forwarder for Low-Volume Logging. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice], 2018, vol. 6, no. 4(40), pp. 21–25.

6. Григорьев И.В., Рудов С.Е. Особенности эксплуатации колесных лесных машин в сложных почвенно-грунтовых и рельефных условиях // Forest Engineering / под ред. И.И. Слепцова. Якутск: Изд. дом СВФУ, 2018. С. 67–71.

Grigorev I.V., Rudov S.E. Operational Features of Wheeled Forest Machines in Complex Soil and Terrain Conditions. *Forest Engineering*. Ed. by I.I. Sleptsov. Yakutsk, NEFU Publ., 2018, pp. 67–71.

7. Григорьев И.В., Чураков А.А. Совершенствование конструкции активного полуприцепа форвардера на базе сельскохозяйственного колесного трактора // Транспортные и транспортно-технологические системы / отв. ред. Н.С. Захаров. Тюмень: ТИУ, 2018. С. 84–88.

Grigorev I.V., Churakov A.A. Improvement of the Construction of the Active Sewer-Trailer of the Forwarder on the Basis of Agricultural Wheel Tractor. *Transport and Transport-Technological Systems*. Ed. by N.S. Zakharov. Tyumen, IUT Publ., 2018, pp. 84–88.

8. 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.

Grigorev I.V., Grigoreva O.I., Churakov A.A. Effective Technologies and Systems of Machines for Low-Volume Wood Logging. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*, 2018, no. 2, pp. 61–66.

9. Григорьев И.В., Жукова А.И., Григорьева О.И., Иванов А.В. Средооадающие технологии разработки лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации. СПб.: СПбГЛТА, 2008. 176 с.

Grigorev I.V., Zhukova A.I., Grigoreva O.I., Ivanov A.V. *Low Impact Technologies for Logging in the Northwestern Federal District of the Russian Federation*. Saint Petersburg, SPbGLTA Publ., 2008. 176 p.

10. Дмитриева М.Н., Григорьев И.В., Рудов С.Е. Анализ исследований взаимодействия колесного движителя лесных машин со слабонесущим почвогрунтом // Resources and Technology. 2019. Т. 16, № 1. С. 10–39.

Dmitrieva M.N., Grigorev I.V., Rudov S.E. Interaction of Wheeled Forestry Machines with Non-Cohesive Soil. *Resources and Technology*, 2019, vol. 16, no. 1, pp. 10–39. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2019.4402>

11. Добрецов Р.Ю., Григорьев И.В., Рудов С.Е., Тетеревлева Е.В., Чемшикова Ю.М. Увеличение подвижности гусеничных и колесных машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 11. С. 4–10.

Dobretsov R.Yu., Grigoryev I.V., Rudov S.E., Teterevleva E.V., Chemshikova Yu.M. Increase in Mobility of Track and Wheel Machines. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair, Reconditioning, Modernization], 2019, no. 11, pp. 4–10. DOI: <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2019-0-11-4-10>

12. Морозов Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения. Изд. 2-е. М.: ЛИБРОКОМ, 2010. 544 с.

Morozov E.M., Zernin M.V. *Contact Problems of Fracture Mechanics*. Moscow, LIBROKOM Publ., 2010. 544 p.

13. Цытович Н.А. Механика грунтов: краткий курс. М.: Высш. школа, 1983. 288 с.

Tsytovich N.A. *Mechanics of Soils*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 288 p.

14. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Рудов С.Е. Особенности взаимодействия лесных машин с мерзлотными почвогрунтами // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2018. С. 187–188.

Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Rudov S.E. Features of Interaction of Forest Machines with Permafrost Soils. *Improving the Efficiency of the Forest Complex. Proceedings of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation*. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2018, pp. 187–188.

15. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И., Иванов В.А. Исследование механических процессов циклического уплотнения почвогрунта при динамических нагрузках // Вестн. КрасГАУ. 2008. № 1. С. 163–175.

Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Zhukova A.I., Ivanov V.A. Study of Mechanical Processes of Cyclic Soil Compaction under Dynamic Loads. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2008, no. 1, pp. 163–175.

16. Antoniadu C., Şlincu C., Stan C., Ciobanu V., Ştefan V. Maximum Loading Heights for Heavy Vehicles Used in Timber Transportation. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*, 2012, vol. 5(54), no. 1, pp. 7–12.

17. Cerato A.B., Lutenege A.J. Specimen Size and Scale Effects of Direct Shear Box Tests of Sands. *Geotechnical Testing Journal*, 2006, vol. 29, iss. 6, pp. 507–516. DOI: <https://doi.org/10.1520/GTJ100312>

18. Grigorev M., Grigoreva A., Grigorev I., Kunickaya O., Stepanova D., Savvinova M., Sidorov M., Tomashevskaya E., Burtseva I., Zakharova O. Experimental Findings in Forest Soil Mechanics. *Eurasian Journal of Biosciences*, 2018, vol. 12, iss. 2, pp. 277–287.

19. Han S.-K., Han H.-S., Page-Dumroese D.S., Johnson L.R. Soil Compaction Associated with Cut-to-Length and Whole-Tree Harvesting of a Coniferous Forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 2009, vol. 39(5), pp. 976–989. DOI: <https://doi.org/10.1139/X09-027>

20. Huber M.T. Zur Theorie der Berührung fester elastischer Körper. *Annalen der Physik*, 1904, vol. 319, iss. 6, pp. 153–163. DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.19043190611>

21. Ivanov V.A., Grigorev I.V., Gasparyan G.D., Manukovsky A.Y., Zhuk A.Yu., Kunitzskaya O.A., Grigoreva O.I. Environment-Friendly Logging in the Context of Water Logged Soil and Knob-and-Ridge Terrain. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 2018, vol. 41, no. 2, pp. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.26480/jmerd.02.2018.22.27>

22. Jarkko L. *Design Parameter Analysis of the Bogie Track Surface Pressure in Peatland Forest Operations*. Master of Science Thesis. Tampere, Tampere University of Technology, 2018. 59 p.

23. Khitrov E.G., Andronov A.V. Bearing Floatation of Forest Machines (Theoretical Calculation). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 695, art. 012020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/695/1/012020>

24. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Sushkov S.I., Kruchinin I.N., Grigorev I.V., Nikiforov A.A., Pilnik Y.N., Teppoev A.V., Lavrov M., Timokhova O.M. Enhancing Quality of Road Pavements through Adhesion Improvement. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 2019, vol. 25, no. 3, pp. 678–694.

25. Lepilin D., Laurén A., Uusitalo J., Tuittila E-S. Soil Deformation and Its Recovery in Logging Trails of Drained Boreal Peatlands. *Canadian Journal of Forest Research*, 2019, vol. 49, no. 7, pp. 743–751. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0385>

26. Nawaz M.F., Bourrié G., Trolard F. Soil Compaction Impact and Modelling. A Review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, vol. 33, iss. 2, pp. 291–309. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>

27. Rudov S.E., Voronova A.M., Chemshikova J.M., Teterleva E.V., Kruchinin I.N., Dondokov Yu.Z., 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, vol. 16, no. 4, pp. 61–75. <https://doi.org/10.3233/AJW190049>

28. Stankić I., Poršinsky T., Tomašić Ž., Tonković I., Frntić M. Productivity Models for Operational Planning of Timber Forwarding in Croatia. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2012, vol. 33, no. 1, pp. 61–78.

THEORETICAL STUDIES OF FORWARDER PRODUCTIVITY WITH LIMITED IMPACT ON SOILS

Olga N. Burmistrova¹, Doctor of Engineering, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2616-7557>

Alexey A. Prosuzhikh¹, Senior Lecturer; ResearcherID: [AAJ-2312-2020](https://orcid.org/0000-0003-1968-3713),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1968-3713>

Egor G. Khitrov², Candidate of Engineering; ResearcherID: [R-8199-2016](https://orcid.org/0000-0003-4569-9508),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>

Olga A. Kunitskaya³, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-9568-2020](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

Elena N. Luneva⁴, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4363-5746>

¹Ukhta State Technical University, ul. Pervomayskaya, 13, Ukhta, Komi Republic, 169300, Russian Federation; e-mail: olga.burm@mail.ru

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, ul. Politechnicheskaya, 29, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; e-mail: yegorkhitrov@gmail.com

³Arctic State Agrotechnological University, sh. Sergelyakhskoye, 3-y km, 3, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), 677007, Russian Federation; e-mail: ola.ola07@mail.ru

⁴Don State Agrarian University, ul. Krivoshlykova, 24, pos. Persianovskiy, Oktyabr'skiy District, Rostov Region, 346493, Russian Federation; e-mail: hizz90@yandex.ru

Abstract. Wheeled forest machines currently dominate the logging industry in Russia and in the world. Every year in Russia, the share of machine-made wood harvesting using Scandinavian technology increases, which involves felling trees, delimiting, and bucking them at a swath. Moreover, this technology is used not only for conventional two-machine systems with harvester and forwarder. In some regions of Siberia three-machine systems are gaining popularity. They consist of a feller-buncher, a swath processor, and a forwarder for

skidding obtained logs. The issue of increasing the efficiency of forwarders is relevant for the timber industry. Its solving is possible on the basis of a comprehensive assessment of design solutions with the use of modern modeling and process optimization tools at the stage of development design. This approach requires deep theoretical and experimental research and is of great scientific and practical interest. When determining the maximum volume of skidded wood, the following machine limitations are considered: by bearing capacity; by tangential traction force; by the traction of the mover with the soil (tangential traction force should not exceed the traction force of the mover with the driving surface – the soil of the logging site). Besides this, there are recommendations to limit the weight of the skidder with the load, based on the permissible track depth after the first pass of the machine; it is believed that this figure should not exceed 20 cm. This statement is supported by the results of studies of the track development under the cyclic influence of the wheel mover (that is when the forwarder repeatedly passes the same section of the portage). This raises the question of forwarder productivity in the skidding operation with the regard to the track depth limitation.

For citation: Burmistrova O.N., Prosuzhik A.A., Khitrov E.G., Kunitskaya O.A., Luneva E.N. Theoretical Studies of Forwarder Productivity with Limited Impact on Soils. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 3, pp. 101–116. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-101-116

Keywords: logging, forwarder productivity, skidding system, soils.