



УДК 629.1.032.001

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-132-145

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ГЛУБИНЫ КОЛЕИ ЛЕСНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ

Р.Ю. Добрецов¹, *д-р техн. наук, доц.*; *ResearcherID: [H-2530-2019](https://orcid.org/0000-0002-3827-0220)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3827-0220>

С.Б. Добрецова¹, *ассистент*; *ResearcherID: [AEF-4221-2022](https://orcid.org/0000-0002-8509-2105)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8509-2105>

С.А. Войнаш², *инж.*; *ResearcherID: [AAK-2987-2020](https://orcid.org/0000-0001-5239-9883)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>

В.А. Соколова³, *канд. техн. наук, доц.*; *ResearcherID: [AAK-6062-2020](https://orcid.org/0000-0001-6880-445X)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251; e-mail: dr-idro@yandex.ru, sdobretsova@mail.ru

²ООО «ПРО ФЕРРУМ», ул. 1-я Красноармейская, д. 1, Санкт-Петербург, Россия, 198005; e-mail: sergey_voi@mail.ru

³Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Тихорецкий просп., д. 3, Санкт-Петербург, Россия, 194064; e-mail: sokolova_vika@inbox.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 28.01.21 / Принята к печати 18.04.21

Аннотация. Рассмотрено влияние внешних сил, действующих на шасси гусеничной машины и участвующих в перераспределении нормальных реакций на опорной поверхности движителя. При систематической эксплуатации лесозаготовительных и лесотранспортных гусеничных машин могут возникать условия, когда только часть опорной поверхности движителя передает нормальные и касательные реакции. В сочетании с «очаговой» передачей нормальных нагрузок, характеризующейся локальными максимумами нагрузки в области опорных катков, рассматриваемый эффект ведет к увеличению перегрузок, а также нормальной и касательной деформаций почвогрунта. В фундаментальных работах по теории движения гусеничных машин этот эффект практически не рассматривается, однако известны результаты наблюдений за ним и примеры его математического описания в смежной области – теории движения транспортных машин. Цель работы – предложить математическую модель, которая позволит оценивать глубину колеи гусеничной машины, прогнозировать энергозатраты в случае ее движения по деформируемым лесным почвогрунтам, учитывая эффект недоиспользования длины опорной поверхности гусеницы при контакте с почвогрунтом. Объектами исследования являются шасси скиддеров, форвардеров и харвестеров, созданных на базе гусеничных тракторов, а также шасси транспортеров-болотоходов и других транспортных и транспортно-технологических машин, используемых в лесозаготовительной и лесотранспортной промышленности. Сформулированы условия, при которых эпюра нормальных реакций под гусеницей приобретает форму треугольника и не захватывает опорную поверхность целиком. Предложены зависимости, позволяющие количественно оценить глубину формируемой колеи, работу при вертикальной деформации лесного

почвогрунта и относительное увеличение мощности сопротивления движению шасси в зависимости от относительной эффективной длины опорной поверхности. В качестве иллюстрации использованы результаты расчетов для связного и слабосвязного почвогрунтов. Разработанная модель применяется самостоятельно, но возможна и ее интеграция в методику расчетной оценки эксплуатационных параметров шасси машин.

Для цитирования: Добрецов Р.Ю., Добрецова С.Б., Войнаш С.А., Соколова В.А. Математическая модель формирования глубины колеи лесной гусеничной машины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 132–145. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-132-145

Ключевые слова: гусеничный движитель, деформируемый грунт, трелевочный трактор, скиддер, форвардер, нагрузка, осадка.

MATHEMATICAL MODEL OF THE TRACK DEPTH FORMATION OF A FORESTRY TRACKED VEHICLE

Roman Yu. Dobretsov¹, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [H-2530-2019](https://orcid.org/0000-0002-3827-0220),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3827-0220>

Svetlana B. Dobretsova¹, Assistant; ResearcherID: [AEF-4221-2022](https://orcid.org/0000-0002-8509-2105),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8509-2105>

Sergey A. Voinash², Engineer; ResearcherID: [AAK-2987-2020](https://orcid.org/0000-0001-5239-9883),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>

Viktoriia A. Sokolova³, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAK-6062-2020](https://orcid.org/0000-0001-6880-445X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>

¹Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, ul. Politekhnikeskaya, 29, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; e-mail: dr-idpo@yandex.ru, sdobretsova@mail.ru

²ООО “PRO FERRUM”, ul. 1-ya Krasnoarmeyskaya, 1, Saint Petersburg, 198005, Russian Federation; e-mail: sergey_voi@mail.ru

³Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, Tikhoretskiy prosp., 3, Saint Petersburg, 194064, Russian Federation; e-mail: sokolova_vika@inbox.ru

Original article / Received on January 28, 2021 / Accepted on April 18, 2021

Abstract. The paper considers the effect of external forces acting on the tracked vehicle chassis and participating in the redistribution of normal reactions on the bearing surface of the continuous track. In the systematic operation of logging and forestry tracked vehicles, conditions may arise when only a part of the bearing surface of the continuous track transmits normal and tangential reactions. In combination with the focus transmission of normal loads, characterized by local maximum loads in the area of supporting rollers, the effect under consideration leads to an increase in overloads, as well as normal and tangential deformations of the soil. The fundamental works on the theory of motion of tracked vehicles practically do not consider this effect, but the results of observations on them and examples of its mathematical description in the related field, the theory of motion of transport vehicles, are known. The research purpose is to propose a mathematical model to estimate the track depth of a tracked vehicle, to predict the energy consumption in case of its motion on deformed forest soils, taking into account the effect of underutilization of the track support surface length in contact with the ground. The objects of research are the chassis of skidders, forwarders and harvesters based on tracked tractors, as well as the chassis of transporters-swamp buggies and other transport and transport technology machines used in logging and timber transportation industry. Conditions under which the epure of normal reactions under the track takes the form of a triangle and does not capture the bearing surface as a whole are formulated. Dependencies

have been proposed to quantify the track depth to be formed, the value of work at the vertical deformation of the forest floor and the relative increase in the power of resistance to the motion of the chassis, depending on the relative effective length of the bearing surface. The results of calculations for cohesive and weakly cohesive soils are used as an illustration. The developed model is used independently; however, its integration into the method of the calculated estimation of the operating parameters of machine chassis is also possible.

For citation: Dobretsov R.Yu., Dobretsova S.B., Voinash S.A., Sokolova V.A. Mathematical Model of the Track Depth Formation of a Forestry Tracked Vehicle. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 2, pp.132–145. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-132-145

Keywords: continuous track, deformed soil, trail tractor, skidder, forwarder, load, draught.

Введение

Гусеничное шасси широко используется в лесозаготовительной промышленности и является базой при создании скиддеров, форвардеров, харвестеров и других специальных машин [20]. Кроме того, оно достаточно часто применяется для промышленных тракторов, гусеничных транспортеров-болотоходов и другой техники.

Для Северо-Западного региона России гусеничное шасси обычно предпочтительнее колесного типа по причине его более высокой проходимости и лучших тягово-сцепных свойств. Статистические данные эксплуатации трелевочных тракторов (например, работа [4]) показывают, что самопередвижение без полезной нагрузки (холостой ход) занимает до 40 % рабочего времени этих машин, в остальное время трактор движется, находясь преимущественно под действием вертикальной и продольной составляющих внешней силы, создаваемой трелевочной пачкой.

При работе гусеничного движителя на опорной поверхности обнаруживаются группы траков, располагающихся вблизи опорных катков и участвующих в передаче вертикальных и продольных сил, – активные участки опорной поверхности. Описание эффекта приводится, например, в статье [15].

Внешнюю силу, действующую на машину, можно разложить на три составляющие. Составляющая, действующая в поперечной плоскости, перераспределяет нормальные реакции между бортами. Составляющие, действующие в плоскости, перпендикулярной опорной поверхности и проходящей через ось продольной симметрии машины, – между катками по бортам. Таким образом, при эксплуатации техники может сложиться ситуация, когда передние катки разгружаются от нормальной реакции [16, 22, 23].

В традиционных работах, основанных на эмпирических данных (исследования А.Р. Рииса и Б. Ганамото – основные результаты приведены в монографии [5]; С.В. Дорогина [3, 13] и др.), а также использующих детерминированное описание процесса взаимодействия гусеницы с полотном пути [1, 8, 14, 15, 18, 19, 21 и др.], указанная специфика не учитывается.

Локализация передачи нагрузок обуславливает появление пиков давления [6, 15, 17], что наряду с ухудшением ряда эксплуатационных свойств усиливает разрушение лесного почвогрунта и колеобразование.

Изучение научной литературы о влиянии веса колесных и гусеничных машин на уплотнение почвогрунтов и образование колеи [25–29, 31–37, 40], а

также о прогнозировании сопротивления движению машин [30, 38] показывает, что чаще всего применяются модели, основанные на статистическом описании свойств поверхности движения. Такой подход полностью оправдан, например, для сложных грунтовых условий, возникающих при армировании лесного почвогрунта корнями деревьев, наличии препятствий в виде пней, валунов и др., однако, как правило, не позволяет детально проанализировать взаимодействие движителя и опорного основания. Для этого более пригодны детерминированные модели, требующие некоторого сужения границ применимости, налагаемых базовыми гипотезами. Отдельное направление представляют собой модели, базирующиеся на методе конечных элементов. Эти методы подразумевают использование существенно больших объемов информации о шасси и достаточно сложных программных средств.

В представленной работе рассматривается детерминированная модель для анализа влияния внешней силы на взаимодействие гусеничного движителя и полотна пути преимущественно подготовленных (песчаных, глинистых) трасс движения. Такой подход расширяет возможности исследователей и позволяет оперативно оценивать воздействие вносимых в конструкцию шасси изменений на эксплуатационные характеристики машин, не дожидаясь накопления статистических данных, что определяет актуальность разработки, совершенствования и применения подобных математических моделей.

Цель исследования – формирование математической модели, позволяющей прогнозировать глубину колеи гусеничной машины и оценивать затраты мощности на движение по деформируемым лесным почвогрунтам с учетом эффекта недоиспользования длины опорной поверхности гусеницы при передаче вертикальных и продольных реакций. В дальнейшем такая модель может найти самостоятельное применение или использоваться в составе более сложных комплексов оценки эксплуатационных характеристик шасси машин.

Объекты исследования – шасси лесозаготовительных и лесотранспортных гусеничных машин, используемых в лесозаготовительной отрасли (скиддеров, форвардеров и харвестеров на базе гусеничного трактора), транспортеров-болотоходов и других транспортных и транспортно-технологических машин.

Методы – базовые подходы теории гусеничных машин; расчетные методы, используемые в механике грунтов; инженерный эксперимент.

Результаты исследования и их обсуждение

В теории движения гусеничных машин обычно принимается допущение, что вертикальные реакции равномерно распределены по опорной поверхности, а их эпюра имеет форму прямоугольника [11]. Центр тяжести находится в геометрическом центре шасси.

Приложение к ведущему колесу силы тяги изменяет форму эпюры. Считается, что она становится трапециевидной (рис. 1, *a*), сосредоточенная нормальная реакция Z смещается на величину x относительно линии действия веса машины (появляется продольное смещение центра давления). Внешние силы – сопротивление внешней среды, вес груза, нагрузка на сцепном устройстве и т. д. – усиливают деформацию эпюры.

Движение гусеничной машины – транспортных гусеничных машин и тракторов – под действием произвольной внешней силы рассматривается в большинстве работ именно для прямоугольной и трапециевидной форм эпюры нормальных реакций. Значительное влияние внешних сил и приобретение вследствие этого эпюрой формы треугольника (рис. 1, б) [7, 14, 22, 24, 39] упоминается как «нерабочий» вариант и не анализируется. Вместе с тем практика использования гусеничных машин показывает, что значительные продольные внешние силы возникают часто и могут действовать на машину длительное время (буксировка прицепов, трелевка, работа траншейного агрегата и др., статистика режимов работы трелевочных тракторов приведена, например, в монографии [4]).

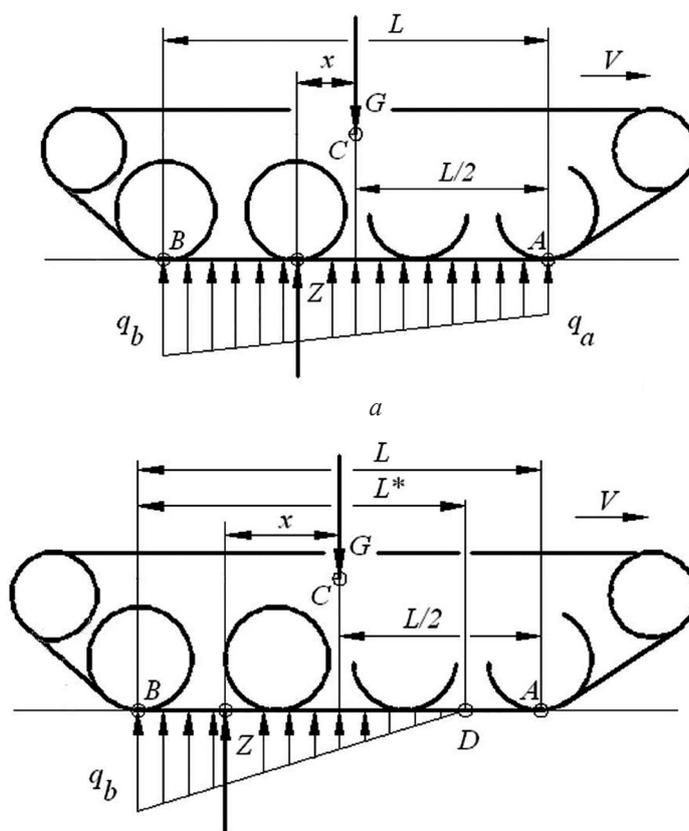


Рис. 1. Деформация эпюры нормальных реакций: а – трапециевидная форма; б – треугольная форма [7]

Fig. 1. Deformation of the epure of normal reactions: а – trapezoidal shape; б – triangular shape [7]

Из рис. 1, б видно, что при достижении некоторых условий нагружения в передачу вертикальных и, следовательно, продольных сил вовлекается длина опорной поверхности машины не целиком: $L^* < L$.

«Недогруженный» участок ветви, который может захватить и траки под передним катком, создает дополнительное сопротивление движению, но полезной работы совершает пренебрежимо мало. Для реализации силы тяги необходима достаточная вертикальная нагрузка, а она в данном случае возникает в основном за счет неподрессоренных масс подвески переднего катка.

Представленные в работе [22] результаты экспериментов над шасси тракторов показывают, что эффект частичной разгрузки опорной поверхности от вертикальных реакций начинает проявляться при значении $|x| \geq L/6$. В традиционных источниках и работах по теории трактора далее эта проблема не рассматривается. В литературе по теории транспортных гусеничных машин данному случаю также не уделяется внимания. Теоретические выкладки по этой проблеме были приведены нами в статье [7]. Покажем, что предложенные в ней подходы распространяемы на случай гусеничного движителя трелевочного трактора.

Из научных источников (например, [14, 24]) известно соотношение $x = \frac{L}{6} \cdot \frac{q_b - q_a}{q_b + q_a}$. В данной зависимости q_a и q_b – нормальное давление в точках A

и B на краях опорной поверхности; $L = |AB|$ (см., например, статью [7]).

При значениях $x = \pm L/6$ из соблюдения условия $q_b + q_a = q_b - q_a$ следует, что $q_a = 0$.

Продольное смещение центров давления гусениц можно оценить, не используя q_a и q_b (см., например, публикации [14, 24]):

$$x = \frac{fZ r_{\text{в.к}}/\eta + P_x(h + r_{\text{в.к}}/\eta) + P_z x_p}{Z}.$$

В соответствии с цитируемыми первоисточниками, приводим расшифровку обозначений: f – коэффициент сопротивления качению; $r_{\text{в.к}}$ – радиус ведущего колеса; η – КПД ходовой системы; P_x и P_z – горизонтальная и вертикальная составляющие внешней силы; h и x_p – вертикальная и горизонтальная координаты точки приложения внешней силы соответственно.

Необходимо указать, что для представленного на рис. 1 случая соблюдаются условия $P_x = 0$ и $P_z = G$, где G – вес машины.

По расчетной схеме на рис. 1, b рассмотрим равновесие опорной поверхности машины относительно точки B :

$$M_b = \frac{1}{2}(2b_r L^* q_b) \frac{L^*}{3} = \frac{b_r q_b (L^*)^2}{3}.$$

где b_r – ширина гусеницы.

Момент реакции опоры при $Z = 2 \cdot \frac{1}{2} b_r L^* q_b = b_r L^* q_b$:

$$M_b = Z(L/2 - x) = b_r q_b L^* (L/2 - x).$$

Таким образом, $b_r q_b L^* \left(\frac{L}{2} - x\right) = \frac{b_r q_b (L^*)^2}{3}$.

Используем понятие относительного продольного смещения центра давления $x_0 = X/L$, тогда при $|x_0| \in [1/6, 1/2)$ выразим:

$$L^* = 3L(0,5 - x_0) \text{ или } L^*/L = 3(0,5 - x_0).$$

По аналогии с [7] обозначим относительную эффективную длину опорной поверхности как L^*/L .

Известно, что вертикальная нагрузка и осадка грунта в механике грунтов связаны соотношением

$$q(x) = k[z(x)]^n,$$

где $q(x)$ – нормальное давление; k , n – эмпирические коэффициенты; z – нормальная осадка.

Чтобы корректно использовать данную зависимость, важно применять подходы, принятые в первоисточниках при определении значений эмпирических коэффициентов в этом выражении. Обратим внимание, что в работе [5] вводится соотношение $k = k_c + bk_\phi$, а в [2] – $k = k_c + k_\phi/b$. Согласно первоисточникам, k_c , k_ϕ – коэффициенты, характеризующие осадку грунта при приложении вертикальной нагрузки на штамп шириной b и определяемые опытным путем. Ширина штампа для случая гусеничной машины принимается равной ширине гусеницы: $b = b_r$.

Эффект многократного нагружения при последовательном прохождении опорных катков определяется, по данным работы [5], осадкой, реализованной под наиболее нагруженным опорным катком: $z_{\max} = \sqrt[n]{q_{\max}/k}$.

Рис. 2. иллюстрирует основные результаты расчетов для трактора массой 8000 кг при ширине гусеницы 300 мм и длине опорной поверхности $L = 3066$ мм при $L^*/L = 0,7$.

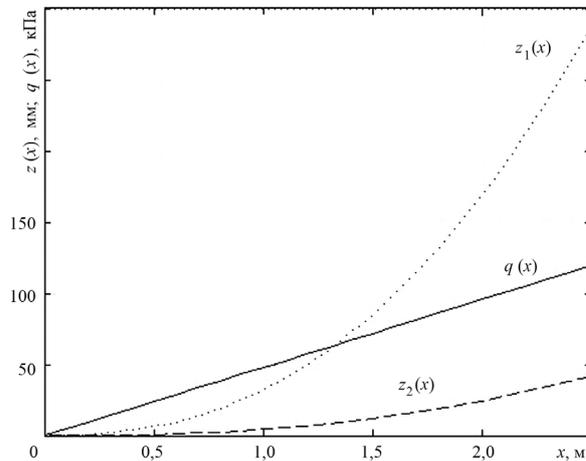


Рис. 2. Изменение расчетных значений нормального давления и осадки на рассматриваемых грунтах при соотношении $L^*/L = 0,7$ [7]

Fig. 2. Change in design values of normal pressure and sedimentation on the considered soils at the ratio $L^*/L = 0.7$ [7]

Для соотнесимости результатов с данными, полученными для транспортной машины [7], использованы следующие параметры почвогрунта [1]:

грунт 1 (слабосвязный): песчаный, $k_c \approx 2,3$ кг/см $^{1+n}$; $k_\phi \approx 0,2$ кг/см $^{2+n}$; $n \approx 0,42$; предельная несущая способность $p_0 \approx 120$ кПа;

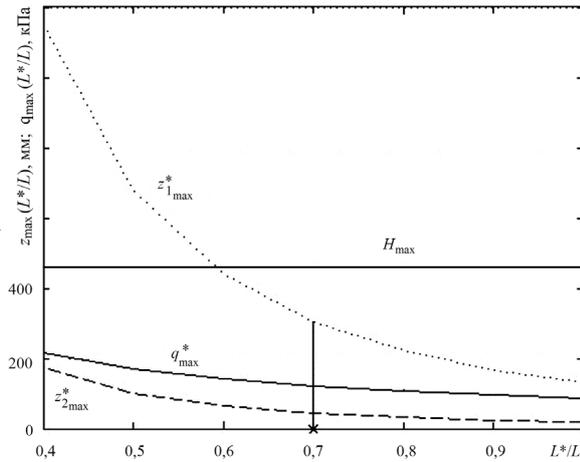
грунт 2 (связный): глинистый $k_c \approx 1,6$ кг/см $^{1+n}$; $k_\phi \approx 0,6$ кг/см $^{2+n}$; $n \approx 0,41$; $p_0 \approx 220$ кПа.

Закономерность изменения q_{\max}^* и z_{\max}^* на отрезке $L^*/L \in [0,4; 1]$ показана на рис. 3. Результаты свидетельствуют, что для слабосвязного почвогрунта предельная несущая способность достигается при $L^*/L \approx 0,7$. В этой ситуации шасси практически теряет подвижность и начинает «закапываться» в грунт. Для дальнейшего использования расчетной модели потребуется ее модификация. Погружение шасси в деформируемый грунт для большинства конструкций ограничено дорожным просветом.

Используя соотношения из работ [14, 24], для трапецевидной эпюры нормальных реакций можно записать:

$$q_{\max} = q_b = \frac{G(1 + 6x_0)}{2b_r L}$$

Рис. 3. Расчетное давление и расчетная глубина колеи на рассматриваемых грунтах
 Fig. 3. Design pressure and design track depth on the considered soils



Для треугольной формы эпюры –

$$q_{\max}^* = \frac{G}{b_r L^*}.$$

Тогда выполняется соотношение, установленное в работе [7]:

$$\frac{z_{\max}^*}{z_{\max}^*} = \sqrt[n]{\frac{q_{\max}^*}{q_{\max}^*}} = \sqrt[n]{\frac{L^*}{2L}(1 + 6x_0)}.$$

Изменение формы эпюры давлений (от трапециевидной к треугольной) не дает «катастрофических» эффектов. Однако с уменьшением значения L^*/L расчетная глубина колеи увеличится, что будет сопровождаться, например, ростом энергозатрат на движение шасси.

Как в [7] оценим работу на нормальную деформацию лесного почвогрунта на площади $dx \times 2b_r$:

$$dA = 2b_r q(x) z(x) dx.$$

Для трапециевидной эпюры можно записать:

$$z(x) = \sqrt[n]{q(x)/k};$$

для треугольной –

$$q(x) = 2q_{\max}^* x/L^*.$$

Оценка производится при равномерном распределении вертикальной нагрузки по гусеницам: $b = 2b_r$.

Энергозатраты (работа) на вертикальное прессование почвогрунта при треугольной форме эпюры давлений оцениваются с помощью выражения

$$A^* = 2b_r \max\{q(x)\} \max\{z(x)\}.$$

Как в [7] записываем:

$$A^* = \frac{2G^{\frac{1+n}{n}}}{(L^*)^{\frac{1+n}{n}} \sqrt[n]{b_r k}}.$$

Предполагаем, что движение машины является прямолинейным и равномерным. Задаем скорость движения V . Тогда мощность на вертикальное пресс-

сование грунта (колеобразование) за время $\Delta t = L^*/V$ может быть оценена по зависимости, не отличающейся от предложенной для транспортных машин [7]:

$$N^* = \frac{A^*}{t} = \frac{2VG^{\frac{1+n}{n}}}{(L^*)^{\frac{1+2n}{n}} \sqrt[n]{b_r k}}, \text{ при } |x_0| \in [1/6, 1/2).$$

Отметим, что условия эксплуатации лесных машин заметно отличаются от условий эксплуатации транспортных машин.

Учитывая статистику режимов работы [4], оценим затраты мощности на образование колеи у трелевочного трактора. На рис. 4 приведены результаты расчета для скорости прямолинейного движения 2 м/с. Потери мощности в силовой передаче и ходовой части не учитывались.

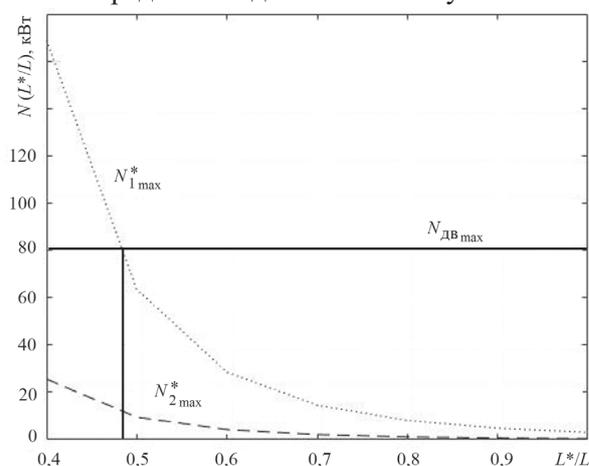


Рис. 4. Затраты мощности и колеобразование на рассматриваемых грунтах ($N_{\text{дв max}}$ – максимальная мощность двигателя)

Fig. 4. Power consumption and tracking on the considered soils ($N_{\text{дв max}}$ – maximum engine power)

По аналогии со случаем транспортной машины применима зависимость, позволяющая оценить относительное изменение мощности на вертикальное прессование лесного почвогрунта в функции параметра L^*/L (на рис. 5 представлены результаты расчетов для связного почвогрунта):

$$N^*/N = (L^*/L)^{\frac{1+2n}{n}} \geq 1, \text{ при } |x_0| \in [1/6, 1/2).$$

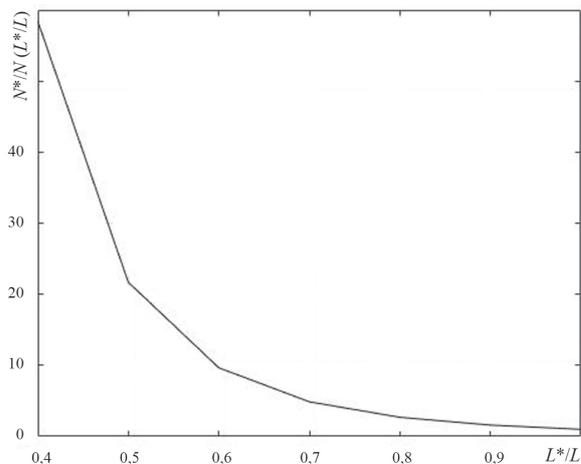


Рис. 5. Изменение относительной мощности, затрачиваемой на образование колеи, в функции $N^*/N(L^*/L)$ при $L^*/L \in [0,4; 1]$

Fig. 5. Change in the relative power expended on tracking, as a function of $N^*/N(L^*/L)$ when

$$L^*/L \in [0,4; 1]$$

На связных грунтах при усредненном коэффициенте сопротивления движению $f = 0,078$ мощность сопротивления движению рассматриваемой машины составляет до 40 кВт.

Таким образом, значение L^*/L оказывает существенное влияние на затраты мощности при передвижении гусеничной машины. Важно использовать данный параметр, например, в моделях комплексной оценки энергетической эффективности шасси гусеничной машины [9, 12].

Помимо условий образования колеи треугольная эпюра нормальных реакций изменит и условия формирования сил тяги на поверхности движителя. На участке опорной поверхности, «недогруженном» нормальными реакциями, ожидается проявление негативных эффектов, связанных со звенчатостью гусеницы [3, 8, 13, 18], а на «перегруженном» – с буксованием.

Заключение

Итак, относительная эффективная длина опорной поверхности – параметр, характеризующий энергетическую эффективность гусеничного шасси. Выполнение условия «относительная эффективная длина опорной поверхности $\rightarrow 1$ » следует обеспечивать на этапах проектирования и эксплуатации машин.

Значение относительной эффективной длины опорной поверхности определено действующими на гусеничное шасси при эксплуатации силами. Вместе с тем передача нормальных и, следовательно, касательных реакций для большинства конструкций гусеничных движителей локализована вблизи опорных катков. Даже при «недоиспользовании» площади опорной поверхности такой эффект будет сохраняться.

Традиционная теория движения гусеничных машин не рассматривает влияние относительной эффективной длины опорной поверхности на момент сопротивления повороту и требуемые силы тяги на гусеницах.

Таким образом, можно резюмировать следующие положения:

1. Глубина колеи на деформируемых грунтах и связанные с процессом ее образования энергозатраты существенно зависят от длины части опорной поверхности движителя, непосредственно участвующей в передаче нагрузок.

2. Предложенный подход позволяет оценить влияние условий нагружения машины при эксплуатации на процесс образования колеи с учетом конструктивных параметров движителя.

3. Представляет интерес построение модели, учитывающей влияние балласта на процесс образования колеи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Авотин Е.В., Добрецов Р.Ю. Методика расчета нормальных давлений на опорной поверхности гусеницы транспортной машины // Науч.-техн. вед. СПбГПУ. Сер.: Наука и образование. 2011. № 3. С. 103–108. Avotin E.V., Dobretsov R.Yu. Methods for Calculation of Normal Pressure, Acting on the Ground Contacting Area of the Track of the Transport Vehicle. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Ser.: Nauka i obrazovaniye* [Materials Science. Power Engineering], 2011, no. 3, pp. 103–108.

2. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 230 с. Ageykin Ya.S. *Passing Ability of Vehicles*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1981. 230 p.
3. Акулов С.В., Дорогин С.В., Степанов В.Н. О сдвиге гусениц при прямолинейном движении танка // Вестн. бронетанковой техники. 1959. № 2. С. 48–52. Akulov S.V., Dorogin S.V., Stepanov V.N. On the Displacement of Tracks during Rectilinear Movement of a Tank. *Vestnik bronetankovoy tekhniki*, 1959, no. 2, pp. 48–52.
4. Анисимов Г.М., Кочнев А.М. Основные направления повышения эксплуатационной эффективности гусеничных трелевочных тракторов. СПб.: Политехн. ун-т, 2007. 455 с. Anisimov G.M., Kochnev A.M. *Main Directions of Increasing the Operational Efficiency of Tracked Skidder*. Saint Petersburg, SPbPU Publ., 2007. 455 p.
5. Беккер М.Г. Введение в теорию систем местность - машина: пер. с англ. М.: Машиностроение, 1973. 520 с. Becker M.G. *Introduction to the Theory of Terrain-Machine Systems*. Transl. from English. Moscow, Mashinostroyeniye, 1973. 520 p.
6. Веселов Н.В. Вездеходные транспортно-технологические машины. Конструкции. Конструирование и расчет: моногр. Н. Новгород: РИ «Бегемот», 2010. 320 с. Veselov N.B. *All-Terrain Transport and Technological Vehicles. Construction, Engineering and Calculation*: Monograph. Nizhny Novgorod, RI "Begemot" Publ., 2010. 320 p.
7. Галышев Ю.В., Добрецов Р.Ю. Эффективность использования опорной поверхности гусеничного движителя при передаче нормальных нагрузок // Науч.-техн. вед. СПбГПУ. Сер.: Наука и образование. 2013. № 3(178). С. 272–278. Galishev Yu.V., Dobretsov R.Yu. Efficiency of the Usage of the Ground Contact Area of a Caterpillar Drive under Conditions of Transmitting the Normal Loads. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Ser.: Nauka i obrazovaniye* [Materials Science. Power Engineering], 2013, no. 3(178), pp. 272–278.
8. Добрецов Р.Ю. Особенности работы гусеничного движителя в области малых удельных сил тяги // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2009. № 6. С. 25–31. Dobretsov R.Yu. Features of a Continuous Track in the Area of Low Specific Traction Forces. *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny*, 2009, no. 6, pp. 25–31.
9. Добрецов Р.Ю. Объективная оценка технических характеристик шасси транспортных гусеничных машин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2011. № 2. С. 19–23. Dobretsov R.Yu. Objective Assessment of Technical Characteristics of the Transport Caterpillar Vehicles' Chassis. *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny*, 2011, no. 2, pp. 19–23.
10. Добрецов Р.Ю. Модель взаимодействия гусеницы с грунтом при значительных продольных смещениях центра давления // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Бронетанковая техника и вооружение: тр. XIX Всерос. науч.-практ. конф. Т. 3. / под ред. В.А. Петрова, М.В. Сильникова, А.М. Сазыкина. М.: Рос. акад. ракет. и артиллер. наук, 2016. С. 96–102. Dobretsov R.Yu. Model of Interaction of a Caterpillar with the Ground at Significant Longitudinal Displacements of the Pressure Center. *Actual Problems of Protection and Safety. Armored Vehicles and Weapons. Proceedings of the XIX Scientific and Practical Conference*. Vol. 3. Ed. by V.A. Petrov, M.V. Sil'nikov, A.M. Sazykin. Moscow, RARAN Publ., 2016, pp. 96–102.
11. Добрецов Р.Ю., Семёнов А.Г. О снижении перепадов нагрузки на опорное основание при качении гусеничного движителя // Экология и промышленность России. 2009. № 5. С. 46–49. Dobretsov R.Yu. The Ways of Reduction of Ecological Danger Due to Interaction of Vehicles Caterpillar Movers with Soilsю *Ekologia i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2009, no. 5, pp. 46–49.
12. Добрецова С.Б., Добрецов Р.Ю. О выборе метода построения обобщенного отклика в задаче оценки энергоэффективности шасси транспортной гусеничной машины // Транспортные и транспортно-технологические системы. Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. С. 99–103. Dobretsova S.B., Dobretsov R.Yu. On the Select Build Method of the Gen-

eralized Response in the Task of Assessing the Efficiency the Chassis of the Tracked Vehicle. *Transport and Transport Technology Systems: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Tyumen, TSOGU Publ., 2015, pp. 99–103.

13. Дорогин С.В., Карнаух В.П. Влияние размещения грунтозацепов на сопротивление движению ВГМ // Вестн. бронетанковой техники. 1989. № 11. С. 34–45. Dorogin S.V., Karnaukh V.P. Influence of the Placement of Grousers on the Resistance to Motion of Tracked Military Vehicles (VGM). *Vestnik bronetankovoy tekhniki*, 1989, no. 11, pp. 34–45.

14. Забавников Н.А. Основы теории транспортных гусеничных машин. М.: Машиностроение, 1975. 448 с. Zabavnikov N.A. Fundamentals of the Theory of Transport Tracked Vehicles. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1975. 448 p.

15. Красеньков В.И., Ловцов Ю.И., Быко-Янко А.В. Нормальные давления под гусеницей // Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана. 1982. № 390. С. 3–12. Krasnen'kov V.I., Lovtsov Yu.I., Byko-Yanko A.V. Normal Pressures under the Track. *Trudy MVTU imeni N.E. Baumana*, 1982, no. 390, pp. 3–12.

16. Ксеневиц И.П., Гуськов В.В., Бочаров Н.Ф., Атаманов Ю.Е., Тарасик В.П., Разумовский М.А. Тракторы. Проектирование, конструирование и расчет / под общ. ред. И.П. Ксеневица. М.: Машиностроение, 1991. 544 с. Ksenevich I.P., Gus'kov V.V., Bocharov N.F., Atamanov Yu.E., Tarasik V.P., Razumovskiy M.A. *Tractors. Design, Construction and Calculation*. Ed. by I.P. Ksenevich. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1991. 544 p.

17. Куляшов А.П., Колотилин В.Е. Экологичность движителей транспортно-технологических машин. М.: Машиностроение, 1993. 288 с. Kulyashov A.P., Kolotilin V.E. *Environmental Friendliness of Transport and Technological Vehicles*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1993. 288 p.

18. Мазур А.И., Крюков В.В., Фадеев И.Ф. Механизм взаимодействия гусениц с грунтом // Вестн. бронетанковой техники. 1983. № 3. С. 52–55. Mazur A.I., Kryukov V.V., Fadeyev I.F. Mechanism of Interaction between Tracks and Ground. *Vestnik bronetankovoy tekhniki*, 1983, no. 3, pp. 52–55.

19. Носов С.В. Мобильные энергетические средства: выбор параметров и режимов работы через реологические свойства опорного основания: моногр. Липецк: ЛПГУ, 2006. 228 с. Nosov S.V. *Mobile Power Facilities: The Choice of Parameters and Operating Modes through the Rheological Properties of the Support Base*: Monograph. Lipetsk, LSTU Publ., 2006. 228 p.

20. Пятакин В.И., Григорьев И.В., Редькин А.К., Иванов В.А., Пошарников Ф.В., Шегельман И.Р., Ширнин Ю.А., Кацадзе В.А., Валяжонков В.Д., Бит Ю.А., Матросов А.В., Куницкая О.А. Технология и машины лесосечных работ / под ред. В.И. Пятакина. СПб.: СПбГЛТУ, 2012. 362 с. Patyakin V.I., Grigor'yev I.V., Red'kin A.K., Ivanov V.A., Posharnikov F.V., Shegel'man I.R., Shirnin Yu.A., Katsadze V.A., Valyazhonkov V.D., Bit Yu.A., Matrosov A.V., Kunitskaya O.A. *Technology and Machines of Logging Operations*. Ed. by V.I. Pyatyakin. Saint Petersburg, SPbFTU Publ., 2012. 362 p.

21. Расчет сопротивления движению гусеничной машины // Зарубежная военная техника. Сер. III: Бронетанковая техника и вооружение. 1977. Вып. 1. С. 25–27. Calculation of the Motion Resistance of a Tracked Vehicle. *Zarubezhnaya voyennaya tekhnika. Ser. III: Bronetankovaya tekhnika i vooruzheniye*, 1977, iss. 1, pp. 25–27.

22. Скотников В.А., Маценский А.А., Солонский А.С. Основы теории и расчета трактора и автомобиля / под ред. В.А. Скотникова. М.: Агропромиздат, 1986. 383 с. Skotnikov V.A., Mashchenskiy A.A., Solonskiy A.S. *Fundamentals of Theory and Calculation of a Tractor and a Vehicle*. Ed. by V.A. Skotnikov. Moscow, Agropromizdat Publ., 1986. 383 p.

23. Шарипов В.М. Конструирование и расчет тракторов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2009. 752 с. Sharipov V.M. *Design and Calculation of Tractors*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2009. 752 p.

24. Шеломов В.Б. Теория движения многоцелевых гусеничных и колесных машин. Тяговый расчет криволинейного движения. СПб.: Политехн. ун-т, 2013. 90 с. Shelomov V.B. *Theory of Motion of Multipurpose Tracked and Wheeled Vehicles. Traction Calculation of Curvilinear Motion*. Saint Petersburg, SPbPU Publ., 2013. 90 p.
25. Björheden R. *Rutting and Vibration Levels of the On Track Concept Forwarder on Standardised Test Tracks*. Arbetsrapport 989. Uppsala, Skogforsk, 2018. 28 p.
26. Bygdén G., Eliasson L., Wästerlund I. Rut Depth, Soil Compaction and Rolling Resistance when Using Bogie Tracks. *Journal of Terramechanics*, 2003, vol. 40, iss. 3, pp. 179–190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2003.12.001>
27. Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E. The Impact of Heavy Traffic on Forest Soils: A Review. *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 338, pp. 124–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022>
28. Edlund J., Keramati E., Servin M. A Long-Tracked Bogie Design for Forestry Machines on Soft and Rough Terrain. *Journal of Terramechanics*, 2013, vol. 50, iss. 2, pp. 73–83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2013.02.001>
29. Gerasimov Yu., Katarov V. Effect of Bogie Track and Slash Reinforcement on Sinkage and Soil Compaction in Soft Terrains. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2010, vol. 31, iss. 1, pp. 35–45.
30. Grigorev I., Burmistrova O., Stepanishcheva M., Gasparian G. The Way to Reduce Ecological Impact on Forest Soils Caused by Wood Skidding. *Proceedings of the 14th SGEM GeoConference on Water Resources. Forest, Marine and Ocean Ecosystems*. Sofia, Bulgaria, STEF92 Technology Ltd., 2014, vol. 2, no. SGEM2014, pp. 501–508. DOI: <https://doi.org/10.5593/SGEM2014/B32/S14.067>
31. Grigorev I., Khitrov E., Kalistratov A., Stepanishcheva M. Dependence of Filtration Coefficient of Forest Soils to Its Density. *Proceedings of the 14th SGEM GeoConference on Water Resources. Forest, Marine and Ocean Ecosystems*. Sofia, Bulgaria, STEF92 Technology Ltd., 2014, pp. 339–344. DOI: <https://doi.org/10.5593/SGEM2014/B32/S14.046>
32. Haas J., Ellhöft K.H., Schack-Kirchner H., Lang F. Using Photogrammetry to Assess Rutting Caused by a Forwarder – A Comparison of Different Tires and Bogie Tracks. *Soil and Tillage Research*, 2016, vol. 163, pp. 14–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.04.008>
33. Huat B.B.K., Prasad A., Asadi A., Kazemian S. *Geotechnics of Organic Soils and Peat*. London, CRC Press, 2014. 250 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/b15627>
34. Ivanov V., Stepanishcheva M., Khitrov E., Iliushenko D. Theoretical Model for Evaluation of Tractive Performance of Forestry Machine's Wheel. *Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM: Surveying Geology and Mining Ecology Management*. Sofia, Bulgaria, 2018, vol. 18, pp. 997–1003. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2018/3.2/S14.127>
35. Jarkko L. *Design Parameter Analysis of the Bogie Track Surface Pressure in Peatland Forest Operations*. Master of Science Thesis. Tampere, TTY, 2018. 73 p.
36. Khitrov E., Andronov A., Bogatova E., Kotenev E. Development of Recommendations on Environmental Certification of Forestry Machinery Drives. *Proceedings of the 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM: Surveying Geology and Mining Ecology Management*. Sofia, Bulgaria, 2019, vol. 19, pp. 689–696. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2019/3.2/S14.089>

-
37. Khitrov E., Andronov A., Iliushenko D., Kotenev E. Comparing Approaches of Calculating Soil Pressure of Forestry Machines. *Proceedings of the 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM: Surveying Geology and Mining Ecology Management*. Sofia, Bulgaria, 2019, vol. 19, pp. 649–655. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2019/3.2/S14.084>
38. Khitrov E., Ivanov V., Stepanishcheva M., Kochnev A. Linking the Deformation Moduli and Cone Indices of Forest and Peatland Soils. *Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM: Surveying Geology and Mining Ecology Management*. Sofia, Bulgaria, 2018, vol. 18, pp. 297–304. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2018/3.2/S13.039>
39. Wong J.Y. *Theory of Ground Vehicles*. Wiley, 2001. 528 p.
40. Wong J.Y., Huang W. “Wheels vs. Tracks” – A Fundamental Evaluation from the Traction Perspective. *Journal of Terramechanics*, 2006, vol. 43, iss. 1, pp. 27–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2004.08.003>