

Řavoda, P. Reliability Analysis of Forest Machines Due to FMEA Method / P. Řavoda, J. Kováč, Z. Łukaszczyk // Management Systems in Production Engineering. – 2018. – Vol. 26. – No 4. – P. 200-206. – DOI 10.1515/mspe-2018-0032.

9. J. Kováč, J. Krilek, J. Dvořák and P. Natov. “Research on reliability of forest harvester operation used in the company”. Journal of Forest Science, vol. 59, no. 4, pp. 169-175, 2013.

10. K. Kováčová. “Research of forest machines”, in Proc. of the XIX Międzynarodowa Konferencja Naukowa Studentów Problemy Inżynierii Rolniczej i Leśnej, 2010, pp. 139-145.

11. R. Nancy. Tague’s The Quality Toolbox, 2nd ed. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2004, pp. 236 -240.

12. S.W. Ormon, C.R. Cassady and A.G. Greenwood. “Reliability Prediction Models to Support Conceptual Design”. IEEE Transactions on Reliability, vol. 51, no. 2, pp. 151-157, 2002.

13. Skobtsov, I. G. Estimating the reliability of forestry machine elements with possibility theory application / I. G. Skobtsov, V. N. Shilovskiy, O. L. Dobrynina // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Omsk City, 29–30 марта 2021 года. – Omsk City, 2022. – P. 012071. – DOI 10.1088/1755-1315/954/1/012071.

15. Skobtsov, I. G. Integrated system of criteria for determining operational maintenance of forest and agricultural machinery / I. G. Skobtsov, V. N. Shilovsky, D. G. Konanov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Omsk City, 29–30 марта 2021 года. – Omsk City, 2022. – P. 012072. – DOI 10.1088/1755-1315/954/1/012072.

© **Timokhova O.M.** – Associate Professor, Department of Technology and Transport and Technological Machines, Ukhta State Technical University (USTU), e-mail: chonochka@mail.ru; **Kruchinin I.N.** – Grand PhD in Engineering, Professor of the Department of Transport and Road Construction, Ural State Forest Engineering University (USFEU), e-mail: kinaa.k@yandex.ru; **Burmistrova O.N.** – Grand PhD in Engineering, Professor of the Department of Technology and Transport and Technological Machines, USTU, e-mail: oburmistrova@ugtu.net; **Abramov Ya.I.** – post-graduate student of the Department of Transport and Road Construction, USFEU, e-mail: yarlif@yandex.ru.

УДК 540:631.4

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ УГЛА СКЛОНА НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ПОЧВОГРУНТА ПРИ РАБОТЕ ЛЕСНЫХ МАШИН

До Туан Ань, Н.И. Злобина, В.А. Каляшов, А.Ю. Гурьев, О.И. Григорьева, Е.Г. Хитров

Во многих странах мира достаточно большие запасы лесных ресурсов находятся на горных склонах. Такие природно-производственные условия характерны для Дальнего Востока Российской Федерации, многих стран Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР), в том числе Социалистической Республике Вьетнам, США, ряда европейских стран (Чехия, Австрия, и т.д.). Работы по заготовке древесины в условиях горных лесосек существенно снижают производительность и повышают риски для людей и техники. Во многих индустриально развитых странах мира преобладают машинные способы заготовки древесины, включая освоение лесов на горных склонах. Колесные лесные машины, работающие на горных склонах, прежде всего, оснащаются специальными гусеницами. Необходимо учитывать, что экосистемы горных лесов являются очень ранимыми, при неправильном проведении работ, при избыточном негативном воздействии на почвогрунт, на них могут возникать и быстро развиваться процессы водной и ветровой эрозии. Превышение несущей способности почвогрунта может приводить к возникновению оползней, соскальзыванию машины по склону. В статье представлена математическая модель, позволяющая на практике рассчитать несущую способность почвогрунта под воздействием гусеничного движителя лесной машины с учетом отклонения вектора результирующей нагрузки.

Ключевые слова: лесозаготовки, трелевка, горные леса, лесные машины, уплотнение почвогрунта, несущая способность почвогрунта.

Введение

Многие страны мира обладают значительными запасами леса, произрастающего на сильно пересеченной местности, с крутыми склонами. Такие леса, в том числе, характерны и для РФ (Дальний

Восток, часть Сибири, часть Краснодарского края, и др.) и для Социалистической Республики Вьетнам, в которой более 70% естественных лесов произрастает в горной местности (рис. 1, 2).



Рис. 1. Типичный лесной массив на склоне сопки Хабаровского края



Рис. 2. Типичный лесной массив на горном склоне в Социалистической Республике Вьетнам

Как известно, эффективность проведения лесосечных работ, в том числе и на склонах, складывается из экономических и экологических показателей. Экономические показатели считаются хорошими при достижении возможного минимума себестоимости заготовленной древесины, т.е. минимизации затрат на подготовительные, вспомогательные и основные работы, объем которых во многом зависит от принятой системы машин, режима их работы, технологического процесса и схемы разработки лесосеки [1-5].

Экологические показатели лесосечных работ считаются хорошими при достижении возможного минимума отрицательного воздействия на лесную экосистему, и, соответственно, при достижении минимума затрат на последующее лесовосстановление. При этом степень отрицательного воздействия лесосечных работ на лесную экосистему также во многом зависит от принятой системы машин, режима их работы, технологического процесса и схемы разработки лесосеки [6-10].

Материалы и методы

При работе на склонах, колесные лесные машины, прежде всего, надо оснастить правильным типом гусениц. Конструктивные особенности современных колесных лесных машин, например, универсальный шарнир позволяет полурамам наклоняться в вертикальной плоскости относительно друг друга на угол до 15° . Это разгружает раму при движении машины по пересеченной местности и обеспечивает высокую проходимость. Кроме этого, повышенная устойчивость обеспечивается счет за возможности блокировки шарнира в горизонтальной плоскости.

Применение в конструкциях машин системы горизонтального выравнивания платформы с кабиной, позволяет устойчиво работать на склонах и расширяет функциональные лесных машин. Благодаря высокой устойчивости выше скорость движения на пересеченной местности.

Для предотвращения опрокидывания лесной машины на склоне желательно всегда двигаться прямо вниз и вверх по склону, насколько это возможно. Необходимо избегать движения поперек склона. При валке деревьев с боковой стороны харвестера необходимо следить за неожиданными изменениями устойчивости машины. При этом следует обращать внимание на то, что угол наклона машины может резко измениться, например, при наезде на большой камень, пень или другое препятствие.

Необходимо избегать перемещения харвестера (форвардера) при нагруженном манипуляторе или при повернутой в сторону стреле.

При работе на горных склонах необходимо стараться всегда держать харвестерную головку (загруженный грейферный захват форвардера) как можно ближе к земле. В этом случае машина не может опрокинуться быстро.

Необходимо всегда обеспечивать хорошую видимость в направлении движения.

Следует особенно аккуратно проезжать препятствия. На сложных почвогрунтах надо пытаться уравновесить машину, например, с помощью перемещения гидроманипулятора с харвестерной головкой в сторону подъема. Надо следить за тем, как положение гидроманипулятора влияет на центр тяжести машины.

Надо всегда использовать диапазон низких скоростей и избегать заднего хода машины.

Не следует переключать передачи машины, на крутом склоне поскольку это может привести к переключению трансмиссии на нейтральную передачу. В результате машина может начать неконтролируемо скользить вниз по склону и (или) столкнуться с препятствием и опрокинуться.

Надо избегать работы на горных склонах с максимальной нагрузкой, постоянно обращая внимание на влияние центра тяжести груза на работу и устойчивость машины.

Безопасность работы лесной машины на склоне можно значительно повысить при использовании специальных технических решений, таких как встроенная лебедка, или специальная самоходная лебедка на базе бульдозера, экскаватора, или на специальной гусеничной самоходной базе, управляемой дистанционно.

Конечно, с одной стороны, использование таких технических решений существенно удорожает систему машин для освоения лесов на склонах, а, следовательно, и себестоимость заготовленной древесины. С другой стороны, безопасность персонала всегда стоит на первом месте в приоритетах планирования.

Большое влияние на безопасность работы лесной машины на склоне, а также показатели эффективности ее работы (расход топлива, нагрузки в трансмиссии) оказывает несущая способность массива почвогрунта склона.

С точки зрения воздействия движителя на почвогрунт и его тягово-сцепных свойств, работа лесных машинах на пересеченной местности и склонах связана с отклонением вектора результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности [11]. Это явление, в свою очередь, вызывает снижение несущей способности грунтового основания под воздействием движителя [12, 13]. Вначале рассмотрим вопрос о количественной оценке данного снижения.

Известно, что несущая способность грунтового основания под воздействием движителя определяется по формуле [13]:

$$p_s = p_{s0}\alpha, \quad (1)$$

где p_{s0} – несущая способность грунтового основания без учета глубины распространения деформаций, α – коэффициент учета глубины распространения деформаций в грунтовом основании.

Несущая способность грунтового основания без глубины распространения деформаций оценивается по уравнению [13]:

$$p_{s0} = 0,5J_1B_1N_1b\gamma + N_2\gamma h + J_3B_3N_3C, \quad (2)$$

в котором γ – удельный вес грунта, C – удельное сцепление частиц грунтового основания, h – глубина колеи, образовавшейся под воздействием движителя (здесь учтено постепенное «укрепление» грунта по мере уплотнения), J_1, J_3 – коэффициенты, учитывающие соотношение сторон пятна контакта с грунтовым основанием [12, 13]:

$$J_1 = \frac{l}{l + 0,4b}, \quad J_3 = \frac{l + b}{l + 0,5b}, \quad (3)$$

где l – средняя длина пятна контакта, b – средняя ширина пятна контакта, N_1, N_2, N_3 – коэффициенты, учитывающие влияние угла внутреннего трения частиц грунтового основания на его несущую способность [12, 13]:

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

B_1, B_2 – коэффициенты, учитывающие влияние отклонения вектора результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности на несущую способность [12, 13]:

$$B_1 = \frac{\pi - 4\beta \operatorname{tg} \varphi}{\pi + 4\beta \operatorname{tg} \varphi}, \quad B_3 = \frac{3\pi - 2\beta}{3\pi + 2\beta} \quad (5)$$

где β – угол отклонения вектора результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности.

Известно уравнение для расчета коэффициента учета глубины распространения деформаций в грунтовом основании [13]:

$$\alpha = 1 + \frac{0,5hH^*}{H \cdot (H - h - 0,25H^* \exp(-0,1|\beta|))} \quad (6)$$

где H – глубина распространения деформаций в грунтовом основании, H^* – вспомогательное обозначение [13]:

$$H^* = \frac{\sqrt{2}}{2} b \operatorname{tg} \varphi \cos \frac{3\varphi}{4} \exp\left(\left(\frac{\pi}{4} + \frac{3\varphi}{4}\right) \operatorname{tg} \frac{3\varphi}{4}\right) \quad (7)$$

Результаты исследования

На рисунке 3 представлены результаты расчета несущей способности связного ($C=0,05$ МПа, $\varphi=0^\circ$), на рисунке 4 представлены результаты расчета несущей способности несвязного грунтового ($C=0$ МПа, $\varphi=30^\circ$) основания в зависимости от угла отклонения вектора результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности (расчеты выполнены при $h=0,1$ м, $\gamma=0,02$ МН/м³, $b=0,6$ м, $H=2b/\cos\beta$, $l = 5b$).

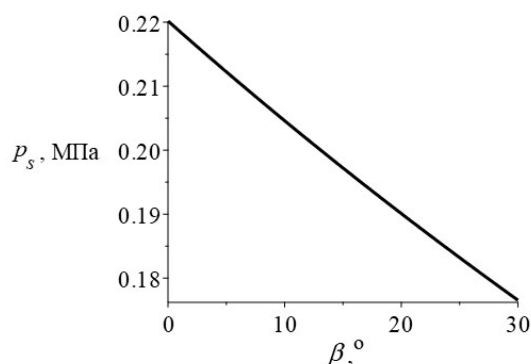


Рис. 3. Результаты расчетов несущей способности связного почвогрунта

Расчеты показывают, что отклонение вектора от нормали приводит к существенному снижению несущей способности почвогрунта под воздействием движителя, что особо ярко выражено на несвязных грунтах (песках), где несущая способность при $\beta=30^\circ$ снижается практически в два раза по сравнению с $\beta = 0^\circ$.

Формулы (1)–(7) неоднократно проверены экспериментально и позволяют получить оценку несущей способности, хорошо согласующуюся с практическими результатами в области изучения проходимости лесных машин [14–21]. Однако, их использование в математических моделях связано со сложностями в проведении расчетов, усложнением алгоритмов и программ для численного решения уравнений для оценки глубины колеи и тягово-сцепных свойств движителей лесных машин, что сужает область их практического применения при обосновании параметров и режимов работы движителей гусеничных машин [22, 23], отвечающих условиям нашего исследования. Решим задачу о получении приближения оценки несущей способности основания, для этого осуществим вычислительный эксперимент. Выявим факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на несущую способность грунта, с целью получить приближенные зависимости, пригодные для практического использования.

Введем обозначения:

$$q_s = p_s(\beta)|_{\beta=0}, \quad (8)$$

$$\delta_\beta = \frac{p_s(\beta)|_{\beta=\text{var}}}{p_s(\beta)|_{\beta=0}} \quad (9)$$

и получим функцию несущей способности в виде:

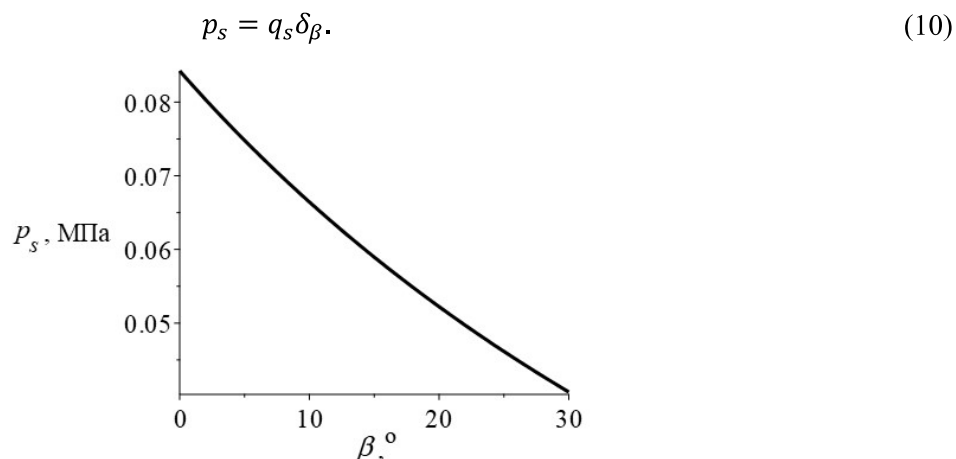


Рис. 4. Результаты расчетов несущей способности несвязного почвогрунта

Графики на рисунках 3 и 4 хорошо иллюстрируют существенное снижение несущей способности массива почвогрунта под нагрузкой при увеличении угла склона. Это означает, что устойчивость лесной машины на крутом склоне будет ограничиваться не только пределом по ее опрокидыванию, но по пределу ее возможного соскальзывания со склона вместе с почвогрунтом.

Результаты расчетов несущей способности q_s без учета уклона получены при случайных равномерно распределенных величинах $C = 0,005$ МПа ... 0,05 МПа, $\varphi = 5^\circ$... 30° , $\gamma = 0,015$ МН/м³ ... 0,025 МН/м³, $b = 0,4$ м ... 0,7 м, $\beta = 0^\circ$, $h = 0,01$ м ... 0,39 м, $H = 2b$, $l = 5b$ (1000 сочетаний). В результате аппроксимации результатов расчетов при помощи метода наименьших квадратов получено уравнение, позволяющее определить q_s практически функционально точно ($R^2 > 0,98$):

$$q_s = 5,22C + \frac{109C + 1,5B}{10000} \varphi^2, \quad (11)$$

результаты сопоставления значений q_s по формуле (11) с численными результатами расчета q_s по формулам (1)–(7) представлены на рисунке 5.

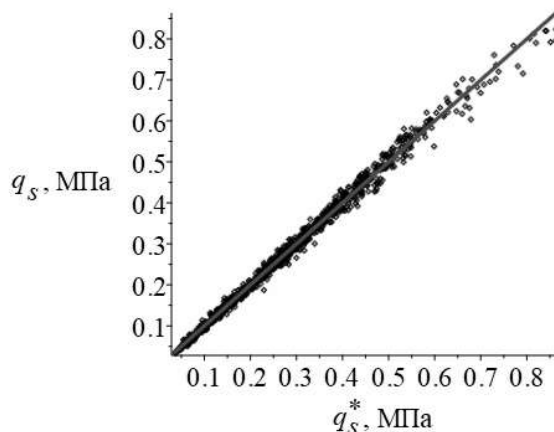


Рис. 5. Сопоставление исходных расчетных данных и результатов аппроксимации (несущая способность почвогрунта при нулевом угле отклонения вектора нагрузки от нормали к опорной поверхности)

Аналогично выполнены расчеты и оценка коэффициента δ_s , учитывающего снижение несущей способности почвогрунта при отклонении вектора нагрузки от нормали к опорной поверхности. Данные получены при $C = 0,005$ МПа ... 0,05 МПа, $\varphi = 5^\circ$... 30° , $\gamma = 0,015$ МН/м³ ... 0,025 МН/м³, $b = 0,4$ м ... 0,7 м, $\beta = 1^\circ$... 30° , $h = 0,01$ м ... 0,39 м, $H = 2b/\cos\beta$, $l = 5b$.

В результате аппроксимации результатов расчетов получено уравнение, позволяющее определить δ_β практически функционально точно ($R^2 > 0,98$):

$$\delta_\beta = 1 - \frac{56 + \varphi}{10000} \beta, \quad (12)$$

результаты сопоставления значений δ_β по формуле (2.12) с численными результатами расчета δ_β по формулам (1)–(7), (9) представлены на рисунке 6.

Таким образом, на основе (10)–(12), получим формулу, позволяющую на практике рассчитать несущую способность почвогрунта под воздействием гусеничного движителя с учетом отклонения вектора результирующей нагрузки:

$$p_s = \left(5,22C + \frac{109C + 1,5B}{10000} \varphi^2 \right) \cdot \left(1 - \frac{56 + \varphi}{10000} \beta \right). \quad (13)$$

Анализ графика на рисунке 5 показывает хорошую сходимость при сопоставлении исходных расчетных данных и результатов аппроксимации (несущая способность почвогрунта при нулевом угле отклонения вектора нагрузки от нормали к опорной поверхности). Это позволяет говорить об адекватности моделирования и принятых допущений.

Сопоставление исходных расчетных данных и результатов аппроксимации (коэффициент снижения несущей способности почвогрунта при увеличении угла отклонения вектора нагрузки от нормали к опорной поверхности), представленное на рисунке 6, также показывает хорошую качественную сходимость, и говорит об адекватности результатов исследования.

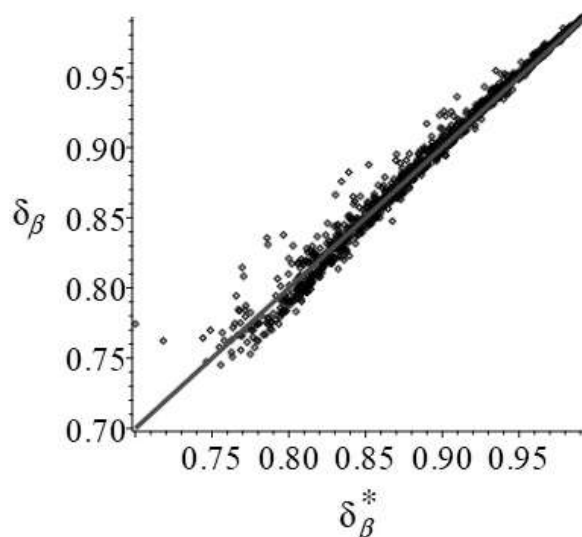


Рис. 6. Сопоставление исходных расчетных данных и результатов аппроксимации (коэффициент снижения несущей способности почвогрунта при увеличении угла отклонения вектора нагрузки от нормали к опорной поверхности)

Таким образом, полученное уравнение (12) может являться основой при разработке математической модели для расчета тягово-сцепных свойств лесной машины с гусеничным движителем, работающей на склоне.

Вывод

В результате математического моделирования получено выражение, позволяющее на практике рассчитать несущую способность почвогрунта под воздействием гусеничного движителя с учетом отклонения вектора результирующей нагрузки. Итоговое уравнение (12) может являться основой при разработке математической модели для расчета тягово-сцепных свойств лесной машины с гусеничным движителем, работающей на склоне.

Авторский вклад

До Туан Ань: проведение расчетов и интерпретация их результатов (50%); Григорьев Г.В.: разработка программы для проведения расчетов (12,5%), Каляшов В.А.: разработка программы для

проведения расчетов (12,5%); Гурьев А.Ю.: анализ проблематики исследования (10%); Григорьева О.И.: анализ проблематики исследования (10%); Хитров Е.Г.: общее руководство работой (5%).

Исследование частично выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>.

Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства».

Литература

1. Григорьев И.В., Куницкая О.А., Рудов С.Е., Давтян А.Б. Пути повышения эффективности работы лесных машин // Энергия: экономика, техника, экология. 2020. № 1. С. 55-63.
2. Григорьев И.В., Куницкая О.А., Просужих А.А., Давтян А.Б., Рудов С.Е. Перспективы создания лесозаготовительных комплексов на базе отечественных строительных и сельскохозяйственных машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 10. С. 3-10.
3. Мануковский А.Ю., Зорин М.В., Просужих А.А., Куницкая О.А., Григорьев И.В. Современные подходы к повышению энергоэффективности и экономичности лесных машин // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности. сборник научных статей по итогам шестой международной научной конференции. Казань, 2020. С. 138-140.
4. Куницкая О.А. Проактивный сервис для лесных машин // Повышение эффективности лесного комплекса. Материалы Шестой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием. Петрозаводск, 2020. С. 86-87.
5. Куницкая О.А., Просужих А.А., Давтян А.Б., Григорьев М.Ф., Григорьева А.И. Организационно-технические решения для повышения коэффициента технической готовности лесных машин // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе. Материалы международной научно-практической конференции. 2020. С. 162-167.
6. Рудов С.Е., Куницкая О.А. Теоретические исследования экологической совместимости колесных лесных машин и мерзлотных почвогрунтов лесов криолитозоны // Транспортные и транспортно-технологические системы. Материалы Международной научно-технической конференции. Отв. редактор Н.С. Захаров. 2020. С. 323-326.
7. Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф., Григорьева А.И. Моделирование процесса динамического уплотнения почвогрунта // IX Международная конференция по математическому моделированию, посвященная 75-летию Владимира Николаевича Врагова. Тезисы докладов. Северо-Восточный федеральный университет, Академия наук Республики Саха (Якутия). 2020. С. 144.
8. Никитина Е.И., Куницкая О.А., Николаева Ф.В. Проект организации лесозаготовок в условиях Алданского лесничества с применением многооперационных лесозаготовительных комплексов // Современные проблемы и достижения аграрной науки в арктике. Сборник научных статей по материалам Всероссийской студенческой научно-практической конференции с международным участием в рамках «Северного форума – 2020» (29–30 сентября 2020 г., Якутск) и Международной научной онлайн летней школы – 2020 (6–20 июля 2020 г., Якутск). 2020. С. 138-148.
9. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Tikhonov E., Makuev V., Egipko S., Hertz E., Zorin M. Modeling the effect of wheeled tractors and skidded timber bunches on forest soil compaction // Journal of Applied Engineering Science. 2021. Т. 19. № 2. С. 439-447.
10. Kunickaya O., Hertz E., Kruchinin I., Tikhonov E., Ivanov N., Dolmatov N., Zorin M., Grigorev I. Pressure control systems for tyre preservation in forestry machinery and forest soils // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2021. Т. 18. № 3. С. 95-102.
11. Хитров Е.Г., Бартенев И.М. Влияние угла поперечного наклона поверхности качения на тягово-цепные свойства колесного движителя // Лесотехнический журнал. - 2016. - № 4 (24). - С. 225-232.
12. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей - М.: Машиностроение, 1981. - 232 с.
13. Ларин В.В. Методы прогнозирования опорной проходимости многоосных колесных машин на местности: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03 - М., 2007. - 530 с.
14. Бурмистрова О.Н., Просужих А.А., Рудов С.Е., Куницкая О.А., Григорьев И.В. Экспериментальные исследования производительности форвардера с учетом его эксплуатационных характеристик, параметров лесосеки, и физико-механических свойств почвогрунта // Resources and Technology. 2021. Т. 18. № 1. С. 94-124.

15.Бурмистрова О.Н., Тетеревлева Е.В., Рудов С.Е., Григорьев И.В., Куницкая О.А. Обоснование исходных требований математической модели взаимодействия колесных транспортных средств на пневматиках низкого давления с лесными почвогрунтами // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 2 (46). С. 94-99.

16.Бурмистрова О.Н., Тетеревлева Е.В., Рудов С.Е., Григорьев И.В., Куницкая О.А. Методика и результаты экспериментальных исследований взаимодействия колесных транспортных средств на пневматиках низкого давления с лесными почвогрунтами // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 1 (45). С. 66-71.

17.Добрецов Р.Ю., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Фам Н.Л. Адаптация принципа низкочастотного импульсного управления поворотом к трансмиссиям лесных и транспортно-тяговых гусеничных машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 11. С. 29-35.

18.Рудов С.Е., Хитров Е.Г., Рудов М.Е., Устинов В.В. Расчет тяговых и сцепных свойств колесного скиддера с использованием данных зарубежных коллег // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 1 (12). С. 223-228.

19.Kochnev A., Khitrov E. Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel Passover // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings. 2018. pp. 1005-1012.

20.Калистратов А.В., Иванов В.А., Коротков Р.К., Хитров Е.Г., Григорьев Г.В. Исследование коэффициента фильтрации лесной почвы (случай дерново-подзолистой почвы) // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 190-193.

21.Григорьев И.В., Никифорова А.И., Пельмский А.А., Хитров Е.Г., Хахина А.М. Экспериментальное определение времени релаксации напряжений лесного грунта // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2013. № 8 (137). С. 77-80.

22.Добрецов Р.Ю., Григорьев И.В., Куницкая О.А. Шасси гусеничного трелевочного трактора с "диагональной" системой управления поворотом // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 1. С. 42-48.

23.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. Т. 14. № 3. С. 172-178.

©**До Туан Ань** – преподаватель, Вьетнамский национальный университет лесного хозяйства, e-mail: anhdo.dhln@gmail.com; **Злобина Н.И.** – старший преподаватель кафедры организации перевозок и безопасности движения, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ имени Г.Ф. Морозов а», e-mail: natasha_boichka@mail.ru; **Каляшов В.А.** – канд. техн. наук., доцент кафедры начертательной геометрии и инженерной графики, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», (ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»), e-mail: vit832@yandex.ru; **Гурьев А.Ю.** – аспирант ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет (ФГБОУ ВО «АГАТУ »), e-mail: sashafuryjager96@gmail.com; **Григорьева О.И.** – канд. с-х наук, доцент кафедры лесоводства ФГБОУ ВО «СПбГЛТУ», e-mail: grigoreva_o@list.ru; **Хитров Е.Г.** – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии лесозаготовительных производств, ФГБОУ ВО «СПбГЛТУ», e-mail:yegorkhitrov@gmail.com.

UDC 540:631.4

THEORETICAL STUDIES OF THE EFFECT OF THE SLOPE ANGLE ON THE BEARING CAPACITY OF THE SOIL DURING THE OPERATION OF FORESTRY MACHINES

Do Tuan Anh, N.I. Zlobina, V.A. Kalyashov, A.Yu. Guryev, O.I. Grigorieva, E.G. Khitrov

In many countries of the world, quite large reserves of forest resources are located on mountain slopes. Such natural and production conditions are typical for the Far East of the Russian Federation, many countries of the Asia-Pacific region (APR), including the Socialist Republic of Vietnam, the USA, a number of European countries (Czech Republic, Austria, etc.). Logging operations in mountainous areas significantly reduce productivity and increase risks to people and machinery. In many industrialized countries of the world, machine logging methods dominate, including the development of forests on mountain slopes. Wheeled forest machines operating on mountain slopes are primarily equipped with special tracks. It is necessary to take into account that ecosystems of mountain forests are very vulnerable, at wrong execution of works, at excessive

account that ecosystems of mountain forests are very vulnerable, at wrong execution of works, at excessive negative influence on soil, processes of water and wind erosion can arise and quickly develop on them. Exceeding the carrying capacity of the soil can lead to landslides, sliding of the machine on the slope. The paper presents a mathematical model that allows us to calculate in practice the bearing capacity of the soil under the influence of the forest machine tracked mover taking into account the deviation of the resultant load vector.

Key words: logging, skidding, mountain forests, forest machines, soil compaction, bearing capacity of soil.

References

1. Grigorev I.V., Kunickaya O.A., Rudov S.E., Davtyan A.B. [Ways to improve the efficiency of forest machines] // Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya [Energy: Economics, Technology, Ecology]. 2020. № 1. pp. 55-63. (InRuss.)
2. Grigorev I.V., Kunickaya O.A., Prosuzhikh A.A., Davtyan A.B., Rudov S.E. [Prospects for the creation of logging complexes based on domestic construction and agricultural machines] // Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya. [Repair. Restoration. Modernization.] 2020. № 10. pp. 3-10. (InRuss.)
3. Manukovskij A.YU., Zorin M.V., Prosuzhikh A.A., Kunickaya O.A., Grigorev I.V. [Modern approaches to improving the energy efficiency and economy of forest machines] // Prioritetnye napravleniya innovacionnoj deyatel'nosti v promyshlennosti. sbornik nauchnyh statej po itogam shestoj mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. Kazan' [Priority directions of innovation activity in industry. collection of scientific articles based on the results of the sixth international scientific conference. Kazan], 2020. pp. 138-140. (InRuss.)
4. Kunickaya O.A. [Proactive service for forest machines] // Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa. Materialy SHestoj Vserossijskoj nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Petrozavodsk [Increasing the Efficiency of the Forestry Complex. Proceedings of the Sixth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation. Petrozavodsk], 2020. pp. 86-87. (InRuss.)
5. Kunickaya O.A., Prosuzhikh A.A., Davtyan A.B., Grigorev M.F., Grigoreva A.I. [Organizational and technical solutions to increase the coefficient of technical availability of forest machines] // Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Energy Efficiency and Energy Saving in Modern Production and Society. Materials of the international scientific-practical conference] 2020. pp. 162-167. (InRuss.)
6. Rudov S.E., Kunickaya O.A. [Theoretical studies of ecological compatibility of wheeled forest machines and permafrost soils of cryolithozone forests] // Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Otv. redaktor N.S. Zaharov [Transport and transport-technological systems. Materials of the International Scientific and Technical Conference. Editor-in-Chief N.S. Zakharov]. 2020. pp. 323-326. (InRuss.)
7. Grigorev I.V., Kunickaya O.A., Grigorev M.F., Grigoreva A.I. [Modeling of dynamic soil compaction process] // IX Mezhdunarodnaya konferenciya po matematicheskomu modelirovaniyu, posvyashchennaya 75-letiyu Vladimira Nikolaevicha Vragova. Tezisy dokladov. Severo-Vostochnyj federal'nyj universitet, Akademiya nauk Respubliki Saha (Yakutiya) [IX International Conference on Mathematical Modeling, dedicated to the 75th anniversary of Vladimir Nikolayevich Vragov. Theses of reports. North-Eastern Federal University, Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia)]. 2020. pp. 144. (InRuss.)
8. Nikitina E.I., Kunickaya O.A., Nikolaeva F.V. [Project for the organization of logging in the conditions of Aldan Forestry with the use of multi-operated logging complexes] // Sovremennye problemy i dostizheniya agrarnoj nauki v arktike. Sbornik nauchnyh statej po materialam Vserossijskoj studencheskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem v ramkah «Severnogo foruma – 2020» (29–30 sentyabrya 2020 g., Yakutsk) i Mezhdunarodnoj nauchnoj onlajn letnej shkoly – 2020 (6–20 iyulya 2020 g., Yakutsk) [Modern problems and achievements of agrarian science in the Arctic. Collection of scientific articles on the materials of the All-Russian student scientific-practical conference with international participation in the framework of "Northern Forum - 2020" (September 29-30, 2020, Yakutsk) and International scientific online summer school - 2020 (July 6-20, 2020, Yakutsk)]. 2020. pp. 138-148. (InRuss.)
9. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Tikhonov E., Makuev V., Egipko S., Hertz E., Zorin M. Modeling the effect of wheeled tractors and skidded timber bunches on forest soil compaction // Journal of Applied Engineering Science. 2021. Vol. 19. № 2. pp. 439-447.

10. Kunickaya O., Hertz E., Kruchinin I., Tikhonov E., Ivanov N., Dolmatov N., Zorin M., Grigorev I. Pressure control systems for tyre preservation in forestry machinery and forest soils // *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. 2021. Vol. 18. № 3. pp. 95-102.

11. Hitrov E.G., Bartenev I.M. [Influence of rolling surface inclination angle on traction properties of a wheeled mover] // *Lesotekhnicheskij zhurnal [Forestry Journal]*. 2016. № 4 (24). pp. 225-232. (InRuss.)

12. Agejkin YA.S. Vehicle mobility - M.: Mashinostroenie [M.: Mechanical Engineering], 1981. - 232 p. (InRuss.)

13. Larin V.V. [Methods for predicting the ground cross-country capability of multi-axle wheeled vehicles]: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.05.03 [Ph. D. in Technical Sciences: 05.05.03]- M., 2007. - 530 p. (InRuss.)

14. Burmistrova O.N., Prosuzhik A.A., Rudov S.E., Kunickaya O.A., Grigorev I.V. [Experimental studies of forwarder performance with regard to its operating characteristics, logging parameters, and physical and mechanical properties of the soil] // *Resources and Technology*. 2021. Vol. 18. № 1. pp. 94-124. (InRuss.)

15. Burmistrova O.N., Teterevleva E.V., Rudov S.E., Grigorev I.V., Kunickaya O.A. [Rationale for the initial requirements of the mathematical model of interaction of wheeled vehicles on low-pressure pneumatics with forest soils] // *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]*. 2020. № 2 (46). pp. 94-99. (InRuss.)

16. Burmistrova O.N., Teterevleva E.V., Rudov S.E., Grigorev I.V., Kunickaya O.A. [Methodology and results of experimental studies of interaction of wheeled vehicles on low-pressure pneumatics with forest soils] // *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]*. 2020. № 1 (45). pp. 66-71. (InRuss.)

17. Dobrecov R.YU., Grigorev I.V., Kunickaya O.A., Fam N.L. [Adapting the principle of low-frequency pulse steering control to transmissions of forestry and transport-tractor tracked machines] // *Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya. [Repair. Restoration. Modernization]*. 2020. № 11. pp. 29-35. (InRuss.)

18. Rudov S.E., Khitrov E.G., Rudov M.E., Ustinov V.V. Raschet tiagovykh i stsepykh svoystv kolesnogo skiddera s ispolzovaniem dannykh zarubezhnykh kolleg [Calculation of Traction and Coupling Properties of a Wheeled Skidder Using Data from Foreign Colleagues] // *Aktualnye napravleniia nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriia i praktika*. 2015. T. 3. № 1 (12). pp. 223-228. (InRuss.)

19. Kochnev A., Khitrov E. Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel Passover // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings. 2018. pp. 1005-1012.

20. Kalistratov A.V., Ivanov V.A., Korotkov R.K., Khitrov E.G., Grigorev G.V. Issledovanie koeffitsienta filtratsii lesnoi pochvy (sluchai dernovo-podzolistoi pochvy) [Investigation of the filtration coefficient of forest soil (case of soddy-podzolic soil)] // *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2014. № 2 (22). pp. 190-193. (InRuss.)

21. Grigorev I.V., Nikiforova A.I., Pelymskii A.A., Khitrov E.G., Khakhina A.M. Eksperimentalnoe opredelenie vremeni relaksatsii napriazhenii lesnogo grunta [Experimental determination of the stress relaxation time of the forest soil] // *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2013. № 8 (137). pp. 77-80. (InRuss.)

22. Dobrecov R.YU., Grigorev I.V., Kunickaya O.A. [Tracked skidder chassis with "diagonal" steering system] // *Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya. [Repair. Restoration. Modernization]*. 2020. № 1. pp. 42-48. (InRuss.)

23. Dobretsov R., Grigorev I., Tikhonov E., Mikheev A., Khakhina A., Storodubtseva T., Shiryayev S., Burgonutdinov A. Impulse control technology for improving steering control systems of the tracked vehicles // *International Review of Automatic Control*. 2021. Vol. 14. № 3. pp. 172-178.

© **Do Tuan Anh** – lecturer, Vietnam National Forestry University, e-mail: anhdo.dhln@gmail.com; **Zlobina N.I.** – Senior Lecturer of the Department of Organization of Transportation and Traffic Safety, VGLTU named after G.F. Morozov, e-mail: natasha_boichka@mail.ru; **Kalyashov V.A.** – PhD in Engineering Sciences, Associate Professor the Department of Descriptive Geometry and Engineering Graphics Department, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbSUATU), e-mail: vit832@yandex.ru; **Guryev A.Yu.** – Postgraduate student, Arctic State Agrotechnological University (ASATU), e-mail: sashafuryjager96@gmail.com; **Grigorieva O.I.** – PhD in Agricultural Sciences, Associate Professor of Forestry Department, SPbSFU, e-mail: grigoreva_o@list.ru; **Khitrov E.G.** – Grand PhD in Engineering Sciences, Professor of the Department of Forestry Technology, SPbSFU, e-mail: yegorkhitrov@gmail.com.