

**М.В. Зорин, С.С. Петросян, О.А. Куницкая, В.А. Макуев,
Н.П. Долматов, И.В. Григорьев, Е.Г. Хитров**

**ИССЛЕДОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ
КОЭФФИЦИЕНТА СЦЕПЛЕНИЯ ДВИЖИТЕЛЯ
С ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Введение. Изучение тягово-сцепных свойств движителей колесных и гусеничных машин остается одним из актуальных направлений исследований в области лесоинженерного дела. К настоящему времени получены практические результаты в области оценки сопротивления движению и сцепления движителя с почвогрунтом [Лухминский, 2018; Песков, 2018; Устинов, 2016; Хахина, 2018; Хитров и др., 2021]. Теоретическую основу составляют методы механики грунтов и теории движения автотранспорта в условиях бездорожья, заложенной в работах отечественных ученых [Агейкин, 1981] и получившей дальнейшее развитие [Ларин, 2007]. Предложены математические модели, позволяющие рассчитать сопротивление деформируемого грунта при прямолинейном движении и при повороте лесной машины [Хитров и др., 2021]. Известны теоретические зависимости, позволяющие рассчитать силу сцепления движителя с опорной поверхностью, учитывающие его параметры и режимы работы, к которым относится буксование (характеризуемое коэффициентом буксования) [Лухминский, 2018; Песков, 2018; Устинов, 2016; Хахина, 2018; Хитров, 2021]. С точки зрения практического использования, полученные результаты неудобны, поскольку для получения числовой оценки силы либо коэффициента сцепления необходимо интегрировать функцию касательного напряжения от деформации сдвига, переменной по длине пятна контакта, что представляет собой трудоемкую вычислительную задачу. Указанные зависимости были реализованы численно при фиксированном значении коэффициента буксования в соответствии с рекомендациями [Saarilahti, 2002]. По терминологии [Saarilahti, 2002] использованное фиксированное значение 0,2 называется «технический коэффициент буксования». На основе результатов аппроксимации расчетных данных получены приближенные формулы, пригодные для практического использования. Однако для получения более точных оценок сцепления движителя с почвогрунтом, необходимо более

строгое исследование, включающее в себя поиск максимального значения интеграла касательного напряжения с учетом переменного коэффициента буксования (в некоторых работах, например [Гуськов, 2008], ставится задача о поиске «оптимального значения коэффициента буксования»). Решению данной вычислительной задачи посвящена предлагаемая статья.

Материалы и методы исследования. Исследование основывается на методах теории движения автомобильного транспорта в условиях бездорожья [Агейкин, 1981; Ларин, 2007]. При реализации теоретических моделей используются сведения о физико-механических свойствах почвогрунтов [Хитров и др., 2019]. Расчеты выполнены в программе Maple 2017 с использованием встроенных команд высокого уровня. Анализ расчетных данных и их аппроксимация выполнены методом наименьших квадратов (МНК) с оценкой значимости коэффициентов аппроксимирующих функций.

Результаты исследования. Сначала приведем общие теоретические зависимости, формирующие исследуемую модель. В работе автора [Агейкин, 1981] сила сцепления определена как интеграл:

$$F_T = b \int_0^l \tau_x(x) dx, \quad (1)$$

где τ_x – касательное напряжение, распределенное вдоль пятна контакта; x – координата по горизонтальной оси; b – ширина пятна контакта; l – длина пятна контакта.

На практике чаще используется коэффициент сцепления [Агейкин, 1981; Хитров, 2021]:

$$\mu_T = \frac{F_T}{pbl} = \frac{1}{pl} \int_0^l \tau_x(x) dx, \quad (2)$$

где p – среднее давление движителя по пятну контакта.

Функция τ_x введена следующим образом [Агейкин, 1981; Хитров, 2021]:

$$\tau_x(x) = \frac{1}{\frac{1}{\tau_{\max}} + \frac{t_{\text{гр}}}{Gj(x)}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{гр}}$ – шаг грунтозацепов, G – модуль сдвига почвогрунта, j – сдвиговая деформация, τ_{\max} – максимальное сопротивление почвогрунта сдвигу.

Считается, что деформация j изменяется вдоль пятна контакта линейно [Агейкин, 1981; Хитров, 2021]:

$$j(x) = Sx, \quad (4)$$

где S – коэффициент буксования движителя машины.

Сопротивление τ_{\max} снижается по мере увеличения сдвиговой деформации [Агейкин, 1981; Хитров, 2021]:

$$\tau_{\max} = p \operatorname{tg} \varphi + C \xi(j), \quad (5)$$

где φ – угол внутреннего трения, C – удельное сцепление почвогрунта, $\xi(j)$ – функция, учитывающая снижение сопротивления грунта [Агейкин, 1981; Хитров, 2021]:

$$\xi(j) = 1 - \frac{j - j_0}{t_{\text{гр}}} \operatorname{He} \left(\frac{j - j_0}{t_{\text{гр}}} \right), \quad (6)$$

где $\operatorname{He}(\dots)$ – единичная функция Хевисайда, доопределенная в нуле:

$$\begin{cases} \operatorname{He} \left(\frac{j - j_0}{t_{\text{гр}}} \right) = 0, & \frac{j - j_0}{t_{\text{гр}}} < 0, \\ \operatorname{He} \left(\frac{j - j_0}{t_{\text{гр}}} \right) = 1, & \frac{j - j_0}{t_{\text{гр}}} \geq 0. \end{cases} \quad (7)$$

Физический смысл зависимостей (5), (6) состоит в том, что в момент, когда сдвиговая деформация превысит некоторое значение j_0 , почвогрунт ослабнет за счет развивающегося среза; таким образом, снизится оценка τ_{\max} .

Величину j_0 можно рассчитать по формуле [Агейкин, 1981]:

$$j_0 = \frac{\tau_0 t_{\text{гр}}}{G} \left(\sqrt{\frac{G}{C}} - 1 \right), \quad (8)$$

где τ_0 – оценка максимального сопротивления почвогрунта без учета развивающегося среза [Агейкин, 1981]:

$$\tau_0 = p \operatorname{tg} \varphi + C. \quad (9)$$

Параметры C , φ , G , $t_{\text{гр}}$ считаем входными; p , b , l также условно отнесем ко входным параметрам; при этом неизвестной величиной остается S . На рис. 1 приведены результаты численного интегрирования (2) при переменной величине S .

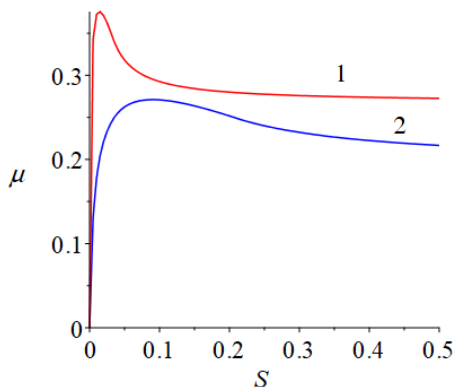


Рис. 1. Коэффициент сцепления в зависимости от коэффициента буксования:

1 – $G = 1,99$ МПа; $C = 0,012$ МПа; $\varphi = 15^\circ$; $b = 0,6$ м; $l = 5$ м; $t_{гр} = 0,14$ м; $p = 0,07$ МПа; 2 – $G = 0,74$ МПа; $C = 0,005$ МПа; $\varphi = 11^\circ$; $b = 0,7$ м; $l = 0,8$ м; $t_{гр} = 0,14$ м; $p = 0,04$ МПа

Fig. 1. Net thrust coefficient depending on the slip ratio:

1 – $G = 1,99$ МПа; $C = 0,012$ МПа, $\varphi = 15^\circ$; $b = 0,6$ м; $l = 5$ м; $t_{гр} = 0,14$ м; $p = 0,07$ МПа; 2 – $G = 0,74$ МПа; $C = 0,005$ МПа; $\varphi = 11^\circ$; $b = 0,7$ м; $l = 0,8$ м; $t_{гр} = 0,14$ м; $p = 0,04$ МПа

По графикам видно, что оценка коэффициента сцепления сперва возрастает, достигает некоторого максимального значения, после чего начинает снижаться. Это обстоятельство согласуется с физической картиной взаимодействия движителя с почвогрунтом: до определенного значения сдвиговой деформации сопротивление будет возрастать, после чего начнет развиваться срез почвогрунта, что приведет к снижению общего сопротивления сдвигу по длине пятна контакта.

Выполним дальнейшие расчеты с целью получить приближенные зависимости, позволяющие определить максимальную оценку коэффициента сцепления и соответствующий ей коэффициент буксования. Расчетные данные получены при варьировании входных параметров модели в следующих диапазонах: $0,4 \text{ МПа} \leq G \leq 10 \text{ МПа}$, $0,005 \text{ МПа} \leq C \leq 0,05 \text{ МПа}$, $5^\circ \leq \varphi \leq 30^\circ$, $0,4 \text{ м} < b \leq 0,8 \text{ м}$, $0,8 \text{ м} \leq l \leq 7 \text{ м}$, $0,1 \text{ м} \leq t_{гр} \leq 0,4 \text{ м}$, $0,02 \text{ МПа} \leq p \leq 0,2 \text{ МПа}$, $0 \leq S \leq 0,5$. В результате обработки полученных числовых данных установлено, что с высокой точностью ($R^2 > 0,95$) максимальный коэффициент сцепления можно оценить по формуле:

$$\mu_{г, \max} = 0,75 \frac{\tau_0}{p}, \quad (10)$$

или, с учетом (9):

$$\mu_{T,\max} = 0,75 \frac{p \operatorname{tg} \varphi + C}{p}. \quad (11)$$

Коэффициент буксования, соответствующий максимальному коэффициенту сцепления, рассчитывается по формуле ($R^2 > 0,95$):

$$S_{\max} = 2,42 \frac{\tau_0 t_{\text{тр}}}{l \sqrt{GC}}, \quad (12)$$

или с учетом (9):

$$S_{\max} = 2,42 \frac{t_{\text{тр}} (p \operatorname{tg} \varphi + C)}{l \sqrt{GC}}. \quad (13)$$

Результаты расчетов по формулам (11), (13) проиллюстрированы на рис. 2. Физико-механические свойства почвогрунта выражены через несущую способность p_s и модуль общей деформации грунта E по формулам [Хитров, 2019]:

$$\begin{cases} E = 10,53 p_s, \\ G = 0,244 E^{0,117}, \\ C = 0,0107 E^{0,7737}, \\ \varphi = 13,669 E^{0,1818}, \end{cases} \quad (14)$$

соотношение $t_{\text{тр}}/l = 0,1$ в (13).

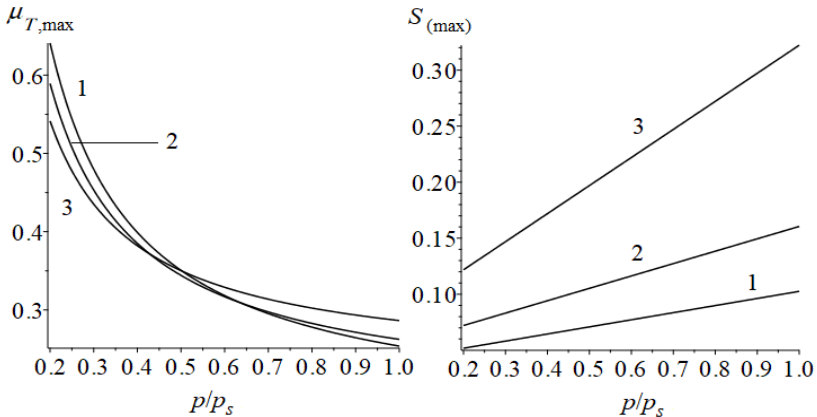


Рис. 2. Иллюстрация результатов расчета максимального коэффициента сцепления и соответствующего коэффициента буксования:

1 – $p_s = 0,045$ МПа; 2 – $p_s = 0,095$ МПа; 3 – $p_s = 0,285$ МПа

Fig. 2. Results of calculating the maximum net thrust coefficient and the corresponding slip ratio:

1 – $p_s = 0,045$ МПа; 2 – $p_s = 0,095$ МПа; 3 – $p_s = 0,285$ МПа

Заключение. В результате выполненного исследования получены зависимости, позволяющие на практике оценить максимальное значение коэффициента сцепления движителя машины с опорной поверхностью и соответствующий ему коэффициент буксования. Уравнения учитывают физико-механические свойства почвогрунта (удельное сцепление, угол внутреннего трения и модуль сдвига) и параметры движителя (длина пятна контакта, среднее давление по пятну контакта, шаг грунтозацепов). Полагая, что использование предлагаемых формул позволит проводить уточненный расчет тягово-сцепных свойств движителей колесных и гусеничных лесных машин, взаимодействующих с деформируемым лесным почвогрунтом.

Вклад авторов: Зорин М.В.: идея исследования, формулировка вычислительной задачи (30%); Петросян С.С.: проведение расчетов (25%); Куницкая О.А.: анализ результатов расчетов (10%); Макуев В.А.: анализ результатов расчетов (10%); Долматов Н.П.: разработка программы для проведения расчетов (10%); Григорьев И.В.: анализ и интерпретация результатов расчетов (10%); Хитров Е.Г.: общее руководство работой (5%).

Библиографический список

- Агейкин Я.С.* Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
- Гуськов А.В.* Тягово-сцепные свойства и проходимость колесного движителя по грунтам со слабой несущей способностью // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. 2008. № 2. С. 63–75.
- Ларин В.В.* Методы прогнозирования опорной проходимости многоосных колесных машин на местности: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2007. 530 с.
- Лухминский В.А.* Совершенствование моделей и методов прогнозирования проходимости гусеничных лесных машин: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2018. 179 с.
- Песков В.Б.* Совершенствование моделей для оценки колеобразования и уплотнения почвогрунтов под воздействием движителей колесных лесных машин: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2018. 190 с.
- Устинов В.В.* Оценка тягово-сцепных свойств колесных движителей лесных машин методами теории движения автотранспорта по бездорожью: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2016. 20 с.
- Хахина А.М.* Методы прогнозирования и повышения проходимости колесных лесных машин: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2018. 318 с.
- Хитров Е.Г., Андронов А.В., Хахина А.М., Григорьев Г.В.* Комплексная оценка показателей взаимодействия движителей машин с лесными грунтами на базе методов теории движения транспорта в условиях бездорожья // Resources and Technology. 2021. Т. 18, № 1. С. 1–52.

Хитров Е.Г., Котенев Е.В., Андронов А.В., Тарадин Г.С., Божбов В.Е. Теоретический расчет несущей способности связного грунта по конусному индексу и механическим свойствам // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019. Вып. 226. С. 111–123.

Saarilahti M. Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecowood): Evaluation of the WES-method in assessing the trafficability of terrain and the mobility of forest tractors. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. 28 p.

References

Ageikin Iа.S. Prokhdimost avtomobilei [Vehicles off-the-road locomotion]. M.: Mashinostroenie, 1981. 232 p. (In Russ.)

Guskov A.V. Tiagovo-stsepnnye svoistva i prokhdimost kolesnogo dvizhitelia po gruntam so slaboi nesushchei sposobnostiu [Tractive performance and patency of a wheeled mover on soils with a weak bearing capacity]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana*, 2008, no. 2, pp. 63–75. (In Russ.)

Khakhina A.M. Metody prognozirovaniia i povysheniia prokhdimosti kolesnykh lesnykh mashin: dis. ... d-ra tekhn. nauk [Methods for predicting and improving the cross-country ability of wheeled forest machines]. SPb., 2018. 318 p. (In Russ.)

Khitrov E.G., Andronov A.V., Khakhina A.M., Grigorev G.V. Kompleksnaia otsenka pokazatelei vzaimodeistviia dvizhitelei mashin s lesnymi gruntami na baze metodov teorii dvizheniia transporta v usloviiah bezdorozhia [Comprehensive assessment of indicators of the interaction of machine drivers with forest soils based on methods of the theory of traffic in off-the-road conditions]. *Resources and Technology*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 1–52. (In Russ.)

Khitrov E.G., Kotenev E.V., Andronov A.V., Taradin G.S., Bozhbov V.E. Teoreticheskii raschet nesushchei sposobnosti sviaznogo grunta po konusnomu indeksu i mekhanicheskim svoistvam [Theoretical calculation of the bearing capacity of cohesive soil according to the cone index and mechanical properties]. *Izvestiia Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2019, iss. 226, pp. 111–123. (In Russ.)

Larin V.V. Metody prognozirovaniia opornoj prokhdimosti mnogoosnykh kolesnykh mashin na mestnosti: dis. ... d-ra tekhn. nauk [Methods for predicting the passability of multi-axle wheeled vehicles on the ground]. M., 2007. 530 p. (In Russ.)

Lukhminskii V.A. Sovershenstvovanie modelei i metodov prognozirovaniia prokhdimosti gusenichnykh lesnykh mashin: dis. ... kand. tekhn. nauk [Improving models and methods for predicting the cross-country ability of tracked forest machines]. SPb., 2018. 179 p. (In Russ.)

Peskov V.B. Sovershenstvovanie modelei dlia otsenki koleeobrazovaniia i uplotneniia pochvogruntov pod vozdeistviem dvizhitelei kolesnykh lesnykh mashin:

dis. ... kand. tekhn. nauk [Improving models for assessing rutting and soil compaction under the influence of wheeled forestry vehicles]. SPb., 2018. 190 p. (In Russ.)

Saarilahti M. Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecowood): Evaluation of the WES-method in assessing the trafficability of terrain and the mobility of forest tractors. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. 28 p.

Ustinov V.V. Otsenka tiagovo-stsepynykh svoystv kolesnykh dvizhitelei lesnykh mashin metodami teorii dvizheniia avtotransporta po bezdorozhiu: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Evaluation of the tractive performance of wheeled movers of forest machines by methods of the theory of off-the road vehicles locomotion]. Arkhangel'sk, 2016. 20 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 31.05.2022

Зорин М.В., Петросян С.С., Куницкая О.А., Макуев В.А., Долматов Н.П., Григорьев И.В., Хитров Е.Г. Исследование максимальной оценки коэффициента сцепления движителя с опорной поверхностью // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 239. С. 191–201. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.191-201

Известны теоретические зависимости, позволяющие рассчитать силу сцепления движителя с опорной поверхностью. С точки зрения практического использования, полученные результаты не удобны, поскольку для получения числовой оценки силы либо коэффициента сцепления необходимо интегрировать функцию касательного напряжения от деформации сдвига, переменной по длине пятна контакта, что представляет собой трудоемкую вычислительную задачу. Для уточнения практических оценок сцепления движителя с почвогрунтом, необходимы дальнейшие исследования, включающие в себя поиск максимального значения интеграла касательного напряжения с учетом переменного коэффициента буксования. Решению данной вычислительной задачи посвящена предлагаемая статья. Исследование основывается на методах теории движения автомобильного транспорта в условиях бездорожья. При реализации теоретических моделей используются сведения о физико-механических свойствах почвогрунтов. Расчеты выполнены в программе Maple 2017 с использованием встроенных команд высокого уровня. Анализ расчетных данных и их аппроксимация выполнены методом наименьших квадратов (МНК) с оценкой значимости коэффициентов аппроксимирующих функций. В результате выполненного исследования получены зависимости, позволяющие на практике оценить максимальное значение коэффициента сцепления движителя машины с опорной поверхностью и соответствующий ему

коэффициент буксования. Уравнения учитывают физико-механические свойства почвогрунта (удельное сцепление, угол внутреннего трения и модуль сдвига) и параметры движителя (длина пятна контакта, среднее давление по пятну контакта, шаг грунтозацепов). Полагаем, что использование предлагаемых формул позволит проводить уточненный расчет тягово-сцепных свойств движителей колесных и гусеничных лесных машин, взаимодействующих с деформируемым лесным почвогрунтом.

Ключевые слова: коэффициент буксования, тягово-сцепные свойства движителей лесных машин, движение по бездорожью.

Zorin M.V., Petrosjan S.S., Kunickaja O.A., Makuev V.A., Dolmatov N.P., Grigor'ev I.V., Khitrov E.G. Study of the maximum estimate of vehicle's net thrust coefficient. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehničeskoj Akademii*, 2022, iss. 239, pp. 191–201 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.191-201

Theoretical dependencies are known, which allow estimating the cohesion force of the vehicle with the bearing surface. From the point of view of practical use, the results obtained are not convenient, since in order to obtain a numerical estimate of the force or the net thrust coefficient, it is necessary to integrate the function of shear stress from shear strain, which is variable along the length of the contact patch, which is a laborious computational problem. To clarify practical estimates of the cohesion of the mover to the soil, further research is needed, including the search for the maximum value of the shear stress integral, taking into account the variable slip ratio. This article is devoted to the solution of this computational problem. The study bases on the methods of the theory of off-the-road transport locomotion. When implementing theoretical models, information about the physical and mechanical properties of soils is used. The calculations were made in the Maple 2017 program using built-in high-level commands. The analysis of the calculated data and their approximation were performed by the least squares method (LSM) with an assessment of the significance of the coefficients of the approximating functions. As a result of the study, dependences were obtained that allow in practice to estimate the maximum value of the net thrust coefficient of the vehicle to the bearing surface and the corresponding slip ratio. The equations take into account the physical and mechanical properties of the soil (specific cohesion, the angle of internal friction and the shear modulus) and the vehicle parameters (the length of the contact patch, the average normal pressure over the contact patch, the grousers' spacing). We believe that the use of the proposed formulae will make it possible to carry out a refined calculation of the tractive performance of wheeled and tracked forestry vehicles interacting with deformable forest soil.

Keywords: slip ratio, tractive performance of forestry vehicles, off-the-road locomotion.

ЗОРИН Максим Владимирович – аспирант кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: mr.maks489@ya.ru

ZORIN Maksim V. – PhD student of the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy, Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov.

394087. Timiryazev str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: mr.maks489@ya.ru

ПЕТРОСЯН Сергей Суренович – соискатель кафедры технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5493-1092>.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: petrosyan1974@yandex.ru

PETROSYAN Sergei S. – applicant of the Department of Logging Technology of St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5493-1092>.

194021. Institutskii per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: petrosyan1974@yandex.ru

КУНИЦКАЯ Ольга Анатольевна – профессор кафедры технологии и оборудования лесного комплекса Арктического государственного агротехнологического университета, доктор технических наук. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>.

677007, ш. Сергеляхское, 3 км, д. 3, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия. E-mail: ola.ola07@mail.ru

KUNITSKAYA Olga A. – DSc (Technical), Professor of the Department «Technology and equipment of the forestry complex» of the Arctic State Agrotechnological University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>.

677007. Sergelyakhskoe rd. 3. bld. 3. Yakutsk. Republic of Sakha (Yakutia). Russia. E-mail: ola.ola07@mail.ru

МАКУЕВ Валентин Анатольевич – профессор кафедры транспортно-технологических средств и оборудования лесного комплекса ЛТ 7 Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), доктор технических наук.

141005, ул. 1-я. Институтская, д. 1, г. Мытищи, Россия. E-mail: makuev@mgul.ac.ru

MAKUEV Valentin A. – DSc (Technical), Professor of the Department «Transport and technological means and equipment of the forest complex» LT 7 of the Moscow State Technical University. N.E. Bauman (Mytishchi branch).

141005. 1st. Institutskaya str. 1. Mytishchi. Russia. E-mail: makuev@mgul.ac.ru

ДОЛМАТОВ Николай Петрович – доцент кафедры машин природообустройства Донского государственного аграрного университета, кандидат технических наук.

346410, ул. Фрунзе, д. 3, г. Новочеркасск, Россия. E-mail: dolmanik@yandex.ru

DOLMATOV Nikolai P. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Environmental Engineering, Don State Agrarian University.

346410. Frunze str. 3. Novocherkassk. Russia. E-mail: dolmanik@yandex.ru

ГРИГОРЬЕВ Игорь Владиславович – главный научный сотрудник, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, доктор технических наук. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: silver73@inbox.ru

GRIGORIEV Igor V. – DSc (Technical), Chief Researcher, Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>.

394087. Timiryazev str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: silver73@inbox.ru

ХИТРОВ Егор Германович – профессор кафедры технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: yegorkhitrov@gmail.com

KHITROV Egor G. – DSc (Technical), Professor of the Department of Logging Technology of St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>.

194021. Institutskii per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: yegorkhitrov@gmail.com