

**М.А. Михеевская, В.П. Друзьянова, Д.Д. Бурмистрова, В.В. Швецова,
О.Б. Марков, Д.А. Ильюшенко**

ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ПРЕССОВАНИЯ ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БИОТОПЛИВА

Введение. Топливные брикеты из древесного сырья нашли широкое применение в хозяйстве, брикеты являются экологически чистым источником энергии [Бирман и др., 2020]. Технологический процесс их производства включает в себя несколько операций, основные из которых – транспорт, сушка, измельчение и непосредственно брикетирование (прессования) сырья [Бирман и др., 2020]. Современные исследователи изучают вопросы производства топливных брикетов не только из древесных опилок, но и из коры, ветвей, корневой древесины [Власов и др., 2020; Куницкая и др., 2021; Помигуев и др., 2021]. В этой связи возникает вопрос об оценке показателей эффективности производства биотоплива в самом широком смысле. Ранее был предложен подход к количественной оценке экологической эффективности биотоплива, в рамках которого критерием эффективности является соотношение энергетической стоимости (калорийности) топлива и энергетической себестоимости (затрат энергии на производство биотоплива) [Григорьев и др., 2014]. Получены результаты в области экспериментального исследования затрат энергии, связанных с измельчением сырья. Известны оценки затрат энергии, связанных с сушкой сырья. Но до настоящего времени оценка энергетической себестоимости всего цикла производства не выполнена [Чибирев и др., 2019; Бирман и др., 2020]. Отчасти это связано с многообразием вариантов выполнения отдельных операций и вариативностью свойств сырья. Законченное научное описание энергоемкости производства древесного биотоплива потребует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований. Как уже отмечалось ранее [Коршак и др., 2011; Vlasov et al., 2019; Михеевская и др., 2022], теоретическая база позволяет существенно сократить объем экспериментальной работы, более рационально организовать опыты. Усовершенствованные модели прессования древесного сырья [Михеевская и др., 2022; Куницкая и др., 2021; Помигуев и др., 2021] можно использовать для уточнения энергетических показателей процесса брикетирования. Наша статья посвящена развитию подхода к теоретической оценке затрат энергии на стадии прессования подготовленного древесного сырья.

Методы исследования. Исследование строится на анализе результатов, полученных ранее в области математического моделирования прессования упрочняющихся древесных материалов. В качестве основы использовано нелинейное уравнение прессования древесного материала, учитывающее увеличение предела пластичности материала брикета. Расчеты в статье выполнены с использованием методов приближенного решения дифференциальных уравнений в системе компьютерной математики Maple.

Постановка задачи и результаты исследования. В работе [Михеевская и др., 2022] на основе исследований [Куницкая и др., 2021; Помигуев и др., 2021] было получено уравнение, связывающее сжимающее напряжение σ и относительную деформацию ε материала брикета, учитывающее нелинейное упрочнение древесного сырья при прессовании:

$$\begin{aligned} E_1 \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + \frac{E_1 E_2}{\eta_2} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d^2 \sigma}{dt^2} + \frac{E_1 + E_2}{\eta_2} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \\ + \frac{E_1}{\eta_3} \cdot \left(\frac{d\sigma}{dt} - \frac{d\sigma_T}{dt} \right) \text{Heaviside}(\sigma - \sigma_T) + \\ + \frac{E_1 E_2}{\eta_2 \eta_3} (\sigma - \sigma_T) \text{Heaviside}(\sigma - \sigma_T), \end{aligned} \quad (1)$$

где t – время, E_1 – мгновенный модуль упругости первого материала брикета, E_2 – длительный модуль упругости материала брикета, η_2, η_3 – коэффициенты вязкости материала брикета, σ_T – предел пластичности материала брикета, причем в уравнении (1) рекомендуется использовать степенную зависимость предела пластичности от плотности ρ [Михеевская и др., 2022]:

$$\sigma_T = \alpha \rho^\beta, \quad (2)$$

где α, β – параметры, зависящие от свойств брикетируемого материала (состав, гранулометрический состав, температура, влажность).

Плотность брикета с прямоугольным сечением (стороны обозначены a и b) в формуле (2) рассчитывается с учетом относительной деформации. Относительная деформация материала брикета изменяется по времени и находится по уравнению [Михеевская и др., 2022]:

$$\varepsilon = \frac{\rho_0 ab}{m} \int_0^t v_{\text{пресс}} dt, \quad (3)$$

где ρ_0 – плотность материала брикета в начале прессования, m – масса брикета, $v_{\text{пресс}}$ – скорость рабочего органа пресса, этот параметр технологического процесса считается управляемым. Например, при постоянной скорости прессования:

$$\varepsilon = \frac{\rho_0 ab}{m} v_{\text{пресс}} t. \quad (4)$$

Тогда плотность брикета в зависимости от времени рассчитывается формуле:

$$\rho = \frac{m}{ab \left(\frac{m}{\rho_0 ab} - \int_0^t v_{\text{пресс}} dt \right)} \quad (5)$$

или при постоянной скорости прессования:

$$\rho = \frac{m}{ab \left(\frac{m}{\rho_0 ab} - v_{\text{пресс}} t \right)} \quad (5)$$

Для получения решения (1) необходимы начальные условия, например:

$$\sigma(0) = \frac{d\sigma(t)}{dt} \Big|_{t=0} = 0, \quad (6)$$

а также числовые значения a , b , m (параметры, определяемые требованиями к продукции – брикету); ρ_0 , E , η , α , β (параметры, относящиеся к свойствам прессуемого сырья); $v_{\text{пресс}}$ (управляемый параметр, определяющийся требованиями к технологическому процессу и характеристиками прессового оборудования).

Затраты энергии Q свяжем с работой прессования A :

$$Q = A = \int_0^z P(z) dz, \quad (7)$$

где z – перемещение рабочего органа пресса (от начала контакта с материалом до окончания формирования брикета), $P(z)$ – сила сопротивления перемещению рабочего органа, вызванного прессованием материала.

На настоящем этапе рассмотрим прессование с постоянной скоростью, тогда:

$$z = v_{\text{пресс}} t, \quad (8)$$

следовательно:

$$P(z) = P(t) = ab\sigma(t), \quad (9)$$

и далее на основе результатов численного решения (1) относительно $\sigma(t)$ проведем расчет энергии Q , требующейся для получения брикета с требуемой прочностью:

$$Q \approx v_{\text{пресс}} ab \sum_{i=0}^{n-1} \frac{t_{i+1} - t_i}{2} (\sigma(t_i) + \sigma(t_{i+1})), \quad (10)$$

где индекс i соответствует моменту времени, для которого получено численное решение (1), причем время прессования $T = t_n$ с учетом (6) выразим через требуемую плотность ρ :

$$T = t_n = \frac{1}{v_{\text{пресс}}} \cdot \frac{m}{ab} \cdot \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0 \rho} \right). \quad (11)$$

На рис. 1–3 представлены результаты расчета ρ , P и Q при постоянной скорости прессования $v_{\text{пресс}} = 0,001$ м/с. Исходные данные для расчета приняты по аналогии с работой [Михеевская, 2002] для хвойных древесных опилок (ель, сосна): $m = 0,83$ кг, $\rho_0 = 500$ кг/м³, $a = 0,06$ м, $b = 0,01$ м, $\alpha = 3,949 \cdot 10^{-10}$, $\beta = 2,7197$, $E_1 = 10$ ГПа, $E_2 = 5E_1$, $\eta_2 = 1$ ГПа·с, $\eta_3 = 5\eta_2$ [Куницкая и др., 2021; Помигуев и др., 2021; Хитров и др., 2019; Vlasov et al., 2019].

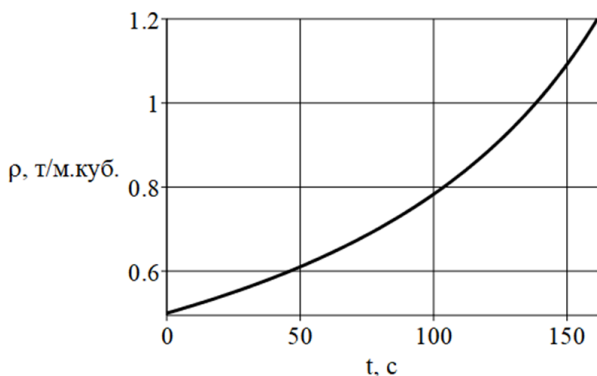


Рис. 1. Плотность брикета в зависимости от времени прессования
Fig. 1. Briquette density vs processing time

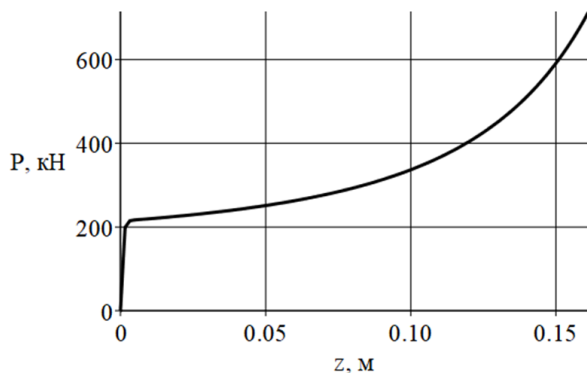


Рис. 2. Сила сопротивления перемещению рабочего органа
Fig. 2. The force of resistance to the movement of the working body

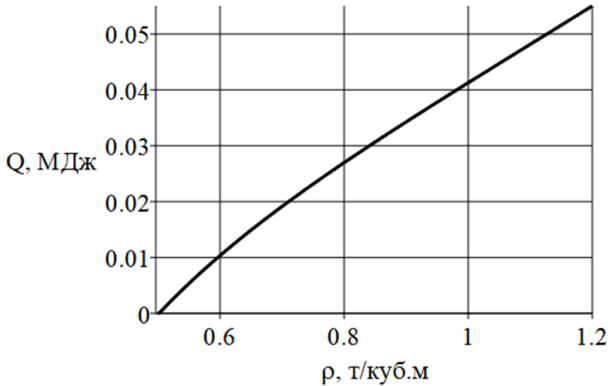


Рис. 3. Пример расчета энергоемкости прессования в зависимости от конечной плотности брикета

Fig. 3. An example of calculating the energy consumption dependence on the briquette's density

Заключение. С использованием уравнения реологии упрочняющегося древесного материала выполнена оценка энергоемкости и силовых параметров прессования хвойных древесных опилок. Результаты проведенных расчетов показали, что затраты энергии, вызванные прессованием материала брикета, практически линейно связаны с плотностью формируемого брикета. Для получения брикета из хвойных древесных опилок плотностью 1 т/м^3 рабочий орган пресса совершает работу ориентировочно 40 кДж; для получения брикета $1,2 \text{ т/м}^3$ – ориентировочно 55 кДж. По теоретической оценке, усилие рабочего органа в конце процесса прессования достигает 700 кН (70 тс). Важно отметить, что оценена только работа при перемещении рабочего органа. В дальнейших исследованиях потребуются уточнение затрат энергии, связанных с переместительными (транспортными) операциями, выдержкой брикета под давлением и извлечением из пресс-формы.

Вклад авторов: Михеевская М.М.: анализ и формулирование проблематики исследования (20%); Друзьянова В.П.: формулирование и реализация математической модели (20%); Бурмистрова Д.Д.: анализ и формулирование проблематики исследования (20%); Швецова В.В.: программная реализация расчетов (15%); Марков О.Б.: формулирование математической модели (15%); Ильюшенко Д.А.: формулирование математической модели (10%).

Библиографический список

Бирман А.Р., Хитров Е.Г., Угрюмов С.А., Власов Ю.Н. Совершенствование производства круглых топливных брикетов из древесных опилок // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2020. № 1. С. 41–46.

Власов Ю.Н., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Хитров Е.Г. Анализ исследований по тематике прессования древесных отходов // Resources and Technology. 2020. Т. 17. № 2. С. 1–22.

Григорьев И.В., Хитров Е.Г., Никифорова А.И., Григорьева О.И., Куницкая О.А. Определение энергоемкости продуктов лесопользования в рамках методики оценки экологической эффективности лесопользования // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2014. Т. 19. № 5. С. 1499–1502.

Коришак А.В., Бирман А.Р., Онегин В.И., Хитров Е.Г. Брикетирование опилок на прессах ударного типа // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2011. Вып. 197. С. 175–181.

Куницкая О.А., Помигуев А.В., Бурмистрова Д.Д., Тихонов Е.А. Теоретический анализ процесса брикетирования измельченных древесных материалов в условиях лесного терминала // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2021. № 9. С. 25–33.

Михеевская М.А., Бурмистрова Д.Д., Стородубцева Т.Н., Швецова В.В., Рябухин П.Б. Теоретическое исследование брикетирования древесных отходов с учетом нелинейного упрочнения сырья // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 240. С. 175–181.

Помигуев А.В., Куницкая О.А., Тихонов Е.А., Чжан С.А. Математическая модель брикетирования измельченных древесных материалов на лесных терминалах // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 3(51). С. 129–134.

Хитров Е.Г., Власов Ю.Н., Угрюмов С.А. Топливные брикеты из древесных опилок и математическое описание процесса их брикетирования // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2019. № 10. С. 34–40.

Чибирев О.В., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф. Расчет потребного давления прессования опилок при формировании брикета // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 2. С. 22–25.

Чибирев О.В., Куницкая О.А., Давтян А.Б. Анализ исследований процесса брикетирования отходов лесопереработки на гидравлическом прессовом оборудовании // Resources and Technology. 2019. Т. 16. № 2. С. 97–118.

Vlasov Ju., Khitrov E., Khakhina A., Gigorev G., Dmitrieva I. Theoretical effect of moulding speed and processing time on sawdust briquettes density // Soils; Forest ecosystems: 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. Conference proceedings. Sophia, 2019. P. 861–868.

References

Birman A.R., Khitrov E.G., Ugriumov S.A., Vlasov Iu.N. Sovershenstvovanie proizvodstva kruglykh toplivnykh briketov iz drevesnykh opilok [Improving the production of round fuel briquettes from sawdust]. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik*, 2020, no. 1, pp. 41–46. (In Russ.)

Chibirev O.V., Kunitskaia O.A., Davtian A.B. Analiz issledovaniia protsessa briketirovaniia otkhodov lesopererabotki na gidravlicheskom pressovom oborudovanii [Analysis of studies of the process of briquetting timber waste on hydraulic press equipment]. *Resources and Technology*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 97–118. (In Russ.)

Chibirev O.V., Kunitskaia O.A., Grigorev M.F. Raschet potrebnogo davleniia pressovaniia opilok pri formirovaniia briketa [Calculation of the required pressure for pressing sawdust when forming a briquette]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiia*, 2019, no. 2, pp. 22–25. (In Russ.)

Grigorev I.V., Khitrov E.G., Nikiforova A.I., Grigoreva O.I., Kunitskaia O.A. Opredelenie energoemkosti produktov lesopolzovaniia v ramkakh metodiki otsenki ekologicheskoi effektivnosti lesopolzovaniia [Determining the energy intensity of forest management products in the framework of the methodology for assessing the environmental efficiency of forest management]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriia: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2014, vol. 19, no. 5, pp. 1499–1502. (In Russ.)

Khitrov E.G., Vlasov Iu.N., Ugriumov S.A. Toplivnye brikety iz drevesnykh opilok i matematicheskoe opisanie protsessa ikh briketirovaniia [Fuel briquettes from sawdust and mathematical description of the process of their briquetting]. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik*, 2019, no. 10, pp. 34–40. (In Russ.)

Korshak A.V., Birman A.R., Onegin V.I., Khitrov E.G. Briketirovanie opilok na pressakh udarnogo tipa [Briquetting sawdust on impact presses]. *Izvestiia Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2011, iss. 197, pp. 175–181. (In Russ.)

Kunitskaia O.A., Pomiguyev A.V., Burmistrova D.D., Tikhonov E.A. Teoreticheskii analiz protsessa briketirovaniia izmelchennykh drevesnykh materialov v usloviakh lesnogo terminala [Theoretical analysis of the process of briquetting of crushed wood materials in the conditions of the timber terminal]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiia*, 2021, no. 9, pp. 25–33. (In Russ.)

Mikheevskaia M.A., Burmistrova D.D., Storodubtseva T.N., Shvetsova V.V., Riabukhin P.B. Teoreticheskoe issledovanie briketirovaniia drevesnykh otkhodov s uchetom nelineinogo uprochneniia syria [Theoretical study of briquetting of wood waste, taking into account the non-linear hardening of raw materials]. *Izvestiia Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2022, iss. 240, pp. 175–181. (In Russ.)

Pomiguyev A.V., Kunitskaia O.A., Tikhonov E.A., Chzhan S.A. Matematicheskai model briketirovaniia izmelchennykh drevesnykh materialov na lesnykh terminalakh [Mathematical model of briquetting of crushed wood materials at timber terminals]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2021, no. 3(51), pp. 129–134. (In Russ.)

Vlasov Iu.N., Grigorev I.V., Kunitskaia O.A., Khitrov E.G. Analiz issledovaniia po tematike pressovaniia drevesnykh otkhodov [Analysis of research on the pressing of wood waste]. *Resources and Technology*, 2020, vol. 17, no. 2, pp. 1–22.

Vlasov Ju., Khitrov E., Khakhina A., Gigorev G., Dmitrieva I. Theoretical effect of moulding speed and processing time on sawdust briquettes density. *Soils; Forest ecosystems: 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. Conference proceedings..* Sophia, 2019, pp. 861–868.

Материал поступил в редакцию 24.10.2022

Михеевская М.А., Друзьянова В.П., Бурмистрова Д.Д., Швецова В.В., Марков О.Б., Ильюшенко Д.А. Энергоемкость прессования древесного сырья при производстве биотоплива // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 241. С. 207–217. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.241.207-217*

Топливные брикеты из древесного сырья нашли широкое применение в хозяйстве, брикеты являются экологически чистым источником энергии. Технологический процесс их производства включает в себя несколько операций, основные из которых – транспорт, сушка, измельчение и непосредственно брикетирование (прессования) сырья. Современные исследователи изучают вопросы производства топливных брикетов не только из древесных опилок, но и из коры, ветвей, корневой. В этой связи возникает вопрос об оценке показателей эффективности производства биотоплива, включая энергоемкость. Статья посвящена развитию подхода к теоретической оценке затрат энергии на стадии прессования подготовленного древесного сырья. Исследование строится на анализе результатов, полученных ранее в области математического моделирования прессования упрочняющихся древесных материалов. В качестве основы использовано нелинейное уравнение прессования древесного материала, учитывающее увеличение предела пластичности материала брикета. Расчеты в статье выполнены с использованием методов приближенного решения дифференциальных уравнений в системе компьютерной математики Maple. Выполнена оценка энергоемкости и силовых параметров прессования хвойных древесных опилок. Результаты проведенных расчетов показали, что затраты энергии, вызванные прессованием материала брикета, практически линейно связаны с плотностью формируемого брикета. Для получения брикета из хвойных древесных опилок плотностью 1 т/м^3 рабочий орган пресса совершает работу ориентировочно 40 кДж; для получения брикета $1,2 \text{ т/м}^3$ – ориентировочно 55 кДж. По теоретической оценке, усилие рабочего органа в конце процесса прессования достигает 700 кН (70 тс).

Ключевые слова: затраты энергии, плотность брикета, уплотнение, упрочняющийся материал

Mikheevskaya M.A., Druzyanova V.P., Burmistrova D.D., Shvetsova V.V., Markov O.B., Iliushenko D.A. Energy consumption of bruquetting raw wooden material in biofuel production. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2022, iss. 241, pp. 207–217 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.241.207-217

Fuel briquettes from wood raw materials are widely used in the economy, briquettes are an environmentally friendly source of energy. The technological process of their production includes several operations, the main of which are transport, drying, grinding and direct briquetting (pressing) of raw materials. Nowadays researchers are studying the production of fuel briquettes not only from sawdust, but also from tree bark, branches and roots. This raises the question of assessing the efficiency of wooden biofuel production, including energy consumption. Our article is devoted to the development of an approach to the theoretical assessment of energy costs at the stage of pressing prepared raw wood materials. The study bases on the analysis of the results obtained earlier in the field of mathematical modeling of the pressing of strengthening wooded materials. As a basis, a non-linear equation for pressing a wood material is used, taking into account the increase in the plasticity limit of the briquette material. The calculations in the article are performed using the methods of approximate solution of differential equations in the Maple computer mathematics system. The estimation of power consumption and power parameters of pressing coniferous wood sawdust is carried out. The results of the calculations showed that the energy costs caused by pressing the briquette material are almost linearly related to the density of the formed briquette. To obtain a briquette from softwood sawdust with a density of 1 t/m^3 , the working body of the press does work of approximately 40 kJ; to obtain a briquette of 1.2 t/m^3 – approximately 55 kJ. According to a theoretical estimate, the force of the working body at the end of the pressing process reaches 700 kN (70 tf).

Keywords: energy consumption, briquette density, compaction, strengthening material

МИХЕЕВСКАЯ Марина Александровна – доцент кафедры технологии и транспортно-технологических машин Ухтинского государственного технического университета, кандидат технических наук. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0962-1490>

169300, ул. Первомайская, 13, Ухта, Республика Коми, Россия. E-mail: voronin.mary@yandex.ru

MIKHEEVSKAIA Marina A. – PhD (Technical), associate professor of the Department of Technology and Transport and Technological Machines of the Ukhta State Technical University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0962-1490>

169300, st. Pervomaiskaya, 13, Ukhta, Komi Republic, Russia. E-mail: voronin.mary@yandex.ru

ДРУЗЬЯНОВА Варвара Петровна – заведующий кафедрой эксплуатации автомобильного транспорта и автосервиса Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, доктор технических наук. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5409-3837>

677000, ул. Белинского, 58, Якутск, Россия. E-mail: druzvar@mail.ru

DRUZYANOVA Varvara P. – DSc (Technical), Head of the Department “Operation of road transport and car service” of the North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosova. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5409-3837>

677000, ul. Belinskogo, 58, Yakutsk, Russia. E-mail: druzvar@mail.ru

БУРМИСТРОВА Дарья Денисовна – аспирант кафедры технологии лесозаготовительных производств Ухтинского государственного технического университета.

169300, ул. Первомайская, д. 13, г. Ухта, Республика Коми.

BURMISTROVA Daria D. – PhD graduate student of the Department of Logging Technology, Ukhta State Technical University.

169300, ul. Pervomaiskaya, 13, Ukhta, Komi Republic.

ШВЕЦОВА Виктория Викторовна – доцент кафедры начертательной геометрии и инженерной графики Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, кандидат технических наук. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8566-2326>

190005, 2я Красноармейская ул., 4, Санкт-Петербург, Россия. vikt.schvetzova2012@yandex.ru

SHVETSOVA Viktoria V. – PhD (Technical), associate professor of the Department of Descriptive Geometry and Engineering Graphics, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8566-2326>

190005, 2nd Krasnoarmeyskaya st., 4, St. Petersburg, Russia. vikt.schvetzova2012@yandex.ru

МАРКОВ Олег Борисович – доцент кафедры транспортных и технологических машин и оборудования Петрозаводского государственного университета, кандидат технических наук.

185910, пр. Ленина, 33, Петрозаводск, Россия. E-mail: markovob@yandex.ru

MARKOV Oleg B. – PhD (Technical), associate professor, Department of Transport and Technological Machines and Equipment, Petrozavodsk State University. 185910, Lenina pr., 33, Petrozavodsk, Russia. E-mail: markovob@yandex.ru

ИЛЮШЕНКО Дмитрий Александрович – доцент кафедры технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7758-5110>.

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

ILIUSHENKO Dmitrii A. – PhD (Technical), associate professor of the Department of Logging Technology of St Petersburg State Forest Technical University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7758-5110>.

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