

## Оценка модуля упругости коры древесины при изгибе по ее прочностным характеристикам

Е.В. Нестерова<sup>1a</sup>, А.М. Хахина<sup>2b</sup>, Д.А. Ильюшенко<sup>1c</sup>, М.В. Степанищева<sup>3d</sup>, В.В. Волошин<sup>3e</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский, 5, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

<sup>a</sup> jenecka-72@mail.ru, <sup>b</sup> anna-hahina@mail.ru, <sup>c</sup> dilium@yandex.ru,

<sup>d</sup> marina01031977@inbox.ru, <sup>e</sup> voloshin04021993@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8548-067X>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7900-8520>, <sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7758-5110>,

<sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4867-3901>, <sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0001-9568-8861>

Статья поступила 04.11.2021, принята 15.11.2021

*Известны различные технологические процессы утилизации отходов окорки. На переработку должно поступать измельченное сырье, причем с определенным гранулометрическим составом. Операция измельчения является одной из важнейших в цикле подготовки коры к переработке. Как показывает анализ литературных источников, использование математических моделей, основанных на положениях механики контактного взаимодействия, позволяет достаточно точно прогнозировать показатели взаимодействия рабочих органов измельчителей с древесными материалами. Для реализации таких моделей необходимо располагать сведениями о физико-механических свойствах материалов, важнейшими среди которых являются модули деформации и пределы прочности при соответствующих воздействиях. До настоящего времени в научной литературе отмечается недостаток сведений о деформативных характеристиках древесной коры. При их определении следует учитывать вариативность плотности и влажности измельчаемого сырья, оказывающую, в свою очередь, влияние на его механические характеристики. Цель исследования состоит в получении оценок модуля деформации коры при изгибе поперек волокон и определении доверительных границ варьирования его величины. Исследование основывается на справочных данных и методах статистической обработки и аппроксимации данных. В качестве допущения принято, что соотношения механических характеристик коры пропорциональны соотношениям соответствующих характеристик древесины. В результате проведенного исследования определены оценки и доверительные границы варьирования модуля деформации коры при изгибе поперек волокон в зависимости от ее плотности. Дополнительно предложены соотношения, уточняющие прогноз значений модуля деформации при изменении влажности коры.*

**Ключевые слова:** модуль упругости при изгибе; предел прочности при сжатии; утилизация; отходы окорки.

## Evaluation of the elastic modulus of the bark according to its strength characteristics

E.V. Nesterova<sup>1a</sup>, A.N. Khakhina<sup>2b</sup>, D.A. Ilyushenko<sup>1c</sup>, M.V. Stepanishcheva<sup>3d</sup>, V.V. Voloshin<sup>3e</sup>

<sup>1</sup> St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 29, Polytechnicheskaya St., St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>a</sup> jenecka-72@mail.ru, <sup>b</sup> anna-hahina@mail.ru, <sup>c</sup> dilium@yandex.ru,

<sup>d</sup> marina01031977@inbox.ru, <sup>e</sup> voloshin04021993@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8548-067X>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7900-8520>, <sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7758-5110>,

<sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4867-3901>, <sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0001-9568-8861>

Received 04.11.2021, accepted 15.11.2021

*Various technological processes for the disposal of debarking waste are known. For the processing, shredded raw materials should be supplied, and with the certain granulometric composition. The shredding operation is one of the most important operations in the cycle of preparing the bark for processing. As the analysis of literary sources shows, the use of mathematical models based on the provisions of the mechanics of contact interaction makes it possible to accurately predict the indicators of the interaction of the working bodies of the shredders with the wood materials. To implement such models, it is necessary to have information on the physical and mechanical properties of materials, the most important of which are the deformation moduli and the strength under corresponding influences. Until now, there is a lack of information in the scientific literature on the deformative characteristics of the tree bark. When determining them, one should take into account the variability of the density and moisture content of the shredded raw material, which, in turn, affects its mechanical characteristics. The aim of the study is to obtain estimates of the modulus of deformation of the bark during its bending across the fibers and to determine the confidence limits for varying its value. The research bases on reference data*

and methods of statistical processing and data approximation. As an assumption, the study accepts that the ratios with the mechanical characteristics of the bark are proportional to the ratios of the corresponding characteristics of the wood. As the result of the study, estimates and confidence limits for their variation in the modulus of deformation of the bark during bending across the fibers, depending on its density, are determined; additionally, the study proposes relations that clarify the prediction of the values of the elasticity modulus when the moisture content of the bark varies.

**Keywords:** modulus of elasticity in bending; strength in compression; disposal; debarking waste.

**Введение.** Утилизация отходов окорки является актуальным направлением повышения эффективности лесопереработки [1–3]. Известны технологические процессы производства топливных брикетов из коры [4–8]. Разработаны плитные изоляционные материалы, в которых кора используется в качестве наполнителя [1; 3; 8]. Кроме того, древесная кора используется в качестве сырья в химической промышленности [1; 3]. Во всех отмеченных случаях на переработку должно поступать измельченное сырье, причем с определенным гранулометрическим составом [1–8]. Операция измельчения является одной из важнейших в цикле подготовки коры к переработке [1–3; 9–11].

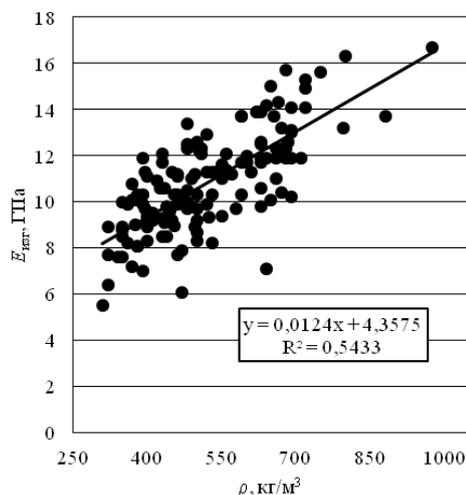
Как показывает анализ литературных источников [1; 3; 12; 13], использование математических моделей, основанных на положениях механики контактного взаимодействия, позволяет достаточно точно прогнозировать показатели взаимодействия рабочих органов измельчителей с древесными материалами. Для реализации таких моделей необходимо располагать сведениями о физико-механических свойствах материалов, важнейшими среди которых являются модули деформации и пределы прочности при соответствующих воздействиях [1; 3; 12; 13].

До настоящего времени в научной литературе отмечается недостаток сведений о деформативных характеристиках древесной коры. При их определении следует учитывать вариативность плотности и влажности измельчаемого сырья, оказывающую, в свою очередь, влияние на его механические характеристики. Кроме того, на механические характеристики измельчаемого сырья воздействуют и иные факторы, например, температура, строение волокон, неоднородность структуры [14].

Цель нашего исследования состоит в получении оценок модуля деформации коры при изгибе поперек волокон и определении доверительных границ варьирования его величины.

**Материалы и методы.** Исследование основывается на справочных данных [15; 16] и методах статистической обработки и аппроксимации данных. В качестве допущения принято, что соотношения с механических характеристик коры пропорциональны соотношениям соответствующих характеристик древесины [17; 19].

**Результаты исследования и их обсуждение.** Вначале изучим данные о механических свойствах древесины. Выборка для анализа включает в себя сведения как отечественных [15], так и зарубежных [16] авторов. На рис. 1 приведены результаты сопоставления данных о плотности древесины и модуле упругости при изгибе поперек волокон (при влажности 12 %).



**Рис. 1.** Сопоставление плотности древесины и модуля упругости при изгибе [15; 16]

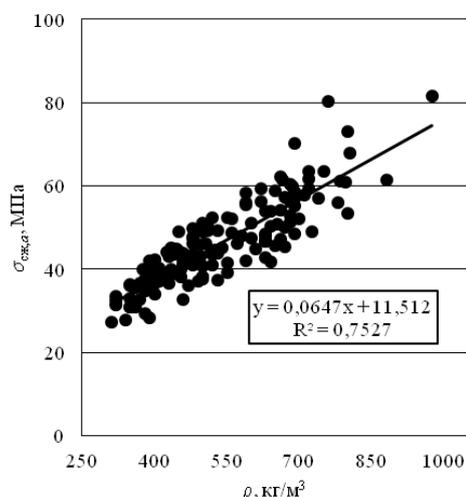
Линейное уравнение, позволяющее приближенно оценить модуль  $E_{изг}$  в зависимости от плотности с учетом доверительных границ варьирования коэффициентов, следующее:

$$E_{изг} = 0,0124 \pm 0,0019 \rho - 3,575 \pm 0,0406 \quad (1)$$

(здесь и далее доверительные границы варьирования коэффициентов определены с учетом стандартной ошибки определения коэффициентов при мощности критерия Стьюдента  $p = 0,05$  [20]).

Важно заметить, что модуль упругости при изгибе может служить для оценки модуля упругости при сжатии вдоль волокон  $E_a$ , причем  $E_a \approx 1,1E_{изг}$  [16].

Объединенные данные [15; 16] о плотности древесины и прочности при сжатии вдоль волокон приведены на рис. 2.



**Рис. 2.** Сопоставление плотности древесины и прочности при сжатии вдоль волокон [15; 16]

В результате обработки справочных данных и оценки доверительных границ варьирования коэффициентов получим линейное уравнение:

$$\sigma_{сж,а} = 0,0647 \pm 0,0031 \rho - 1,5117 \pm 0,3832. \quad (2)$$

Таким образом, в результате обработки справочных данных выявлены устойчивые связи механических характеристик древесины с ее плотностью и проведена оценка доверительных границ варьирования коэффициентов соответствующих уравнений.

Сведения об аналогичных характеристиках коры, представленные в научной литературе, зачастую отрывочны и не систематизированы. Отметим, что в [18; 19; 21; 22] при моделировании окорки древесины свойства коры оценивают по свойствам древесины, принимая соотношения модулей деформации и пределов прочности коры и древесины как 1:10. К выводу о возможности оценки свойств коры по характеристикам древесины приходят авторы обзоров [1; 5]. Подобные допущения оправданы тем обстоятельством, что значения механических характеристик входят в математические модели измельчения в дробных степенях с показателем степени менее 0,5. Таким образом, важно оценить скорее порядок величин, а также установить адекватные соотношения деформативных характеристик сырья и соответствующих пределов прочности.

Проанализируем сведения о некоторых механических характеристиках коры [15] с целью выявить взаимосвязи свойств коры и ее плотности. На рис. 3 сопоставлены значения предела прочности коры при сжатии вдоль волокон и ее плотности.

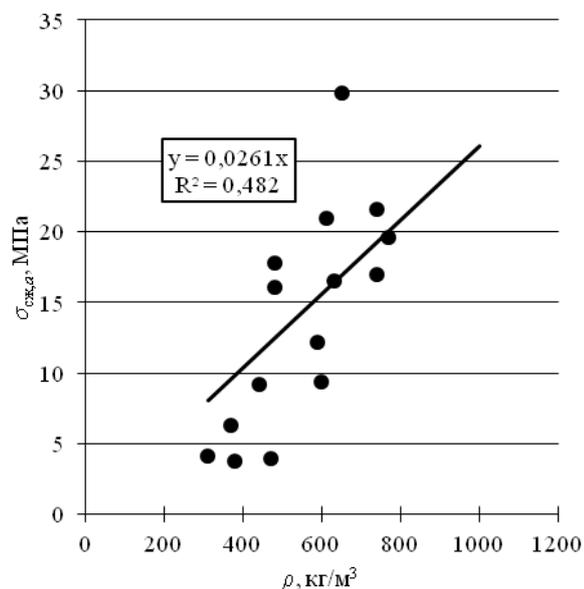


Рис. 3. Сопоставление плотности коры и предела прочности при сжатии вдоль волокон [15]

Обработка табличных данных позволяет получить линейное уравнение:

$$\sigma_{сж,а} = 0,0261 \pm 0,0054 \rho. \quad (3)$$

Отметим, что для  $\sigma_{сж,а}$  получено уравнение с невысокими коэффициентами детерминации  $R^2$ , однако отметим, что расчет коэффициента корреляции  $r$  свидетельствует о статистической значимости линейной корреляции  $\rho$ ,  $\sigma_{сж,а}$ . Таким образом, полученную функцию можем использовать в дальнейшем с учетом рассчитанных границ варьирования ее коэффициентов.

Воспользуемся допущениями [18; 19] и запишем:

$$\frac{\sigma_{сж,а}^k}{E_a^k} \approx \frac{\tau_{сж,а}^d}{E_a^d} \quad (4)$$

или, с учетом [16]:

$$E_a^k \approx 1 E_{изг}^d \frac{\sigma_{сж,а}^k}{\sigma_{сж,а}^d}, \quad (5)$$

где верхний индекс  $k$  соответствует коре; индекс  $d$  — древесине.

Значения модуля упругости древесины при изгибе, а также пределов прочности при сжатии оценим при варьировании плотности по формулам (1)–(3) соответственно. Важно, что при расчете отклонения значений коэффициентов в формулах (1)–(3) можем рассматривать как случайные величины, нормально распределенные в соответствующих пределах  $\pm \Delta_{ai}$ . Таким образом, в результате выполнения вычислительного эксперимента получим новую выборку данных, обработав которую, мы сможем не только проанализировать связь модуля деформации коры с плотностью, но и рассчитать доверительные границы его варьирования.

При реализации эксперимента сгенерировано 100 значений плотности, равномерно распределенных в пределах от 300 до 700 кг/м<sup>3</sup>; по формулам (1)–(3) рассчитаны значения величин в уравнении (5). Результаты вычислений представлены на рис. 4.

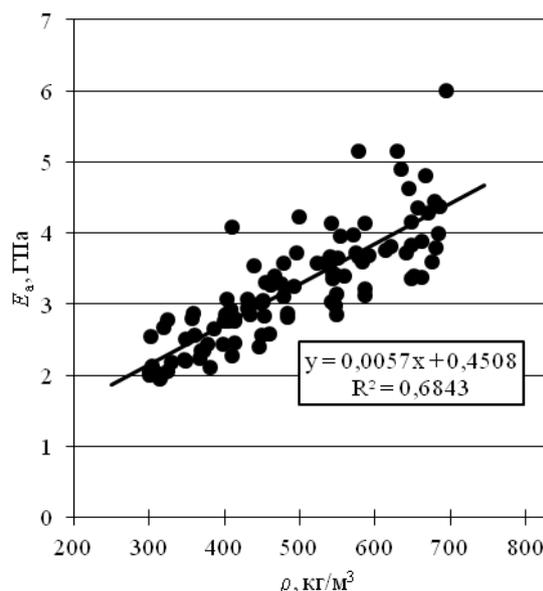


Рис. 4. Результаты реализации вычислительного эксперимента: сопоставление расчетных данных о модуле деформации коры при сжатии вдоль волокон с плотностью

Аппроксимация расчетных данных приводит к получению линейного уравнения:

$$E_a = 0,0057 \pm 0,0008 \rho - 0,4508 \pm 0,3871. \quad (6)$$

По аналогии с оценкой модуля  $E_a$ , можем оценить и другие механические свойства коры; для этого следует реализовать аналогичный вычислительный эксперимент с использованием соответствующих зависимостей. По аналогии с допущениями (4), (5) вводятся допущения о равенстве соотношений соответствующих характеристик; при необходимости учитываются соотношения модулей упругости в радиальном и тангенциальном направлении  $E_r$ ,  $E_t$  и сдвига  $G_{rt}$ ,  $G_{ra}$ ,  $G_{ta}$  с  $E_a$  по сведениям [15; 16]. Модуль деформации по направлению волокон  $E_a$  и предел прочности  $\sigma_{сж,a}$  является наибольшим по величине, таким образом, их значения можно использовать при обосновании скорости рабочего органа, достаточной для измельчения, и оценке энергоемкости процесса измельчения древесного сырья.

Помимо плотности, важным фактором, оказывающим влияние на механические свойства материала, является влажность [15; 16]. Принято оценивать изменение деформативных свойств и прочности древесины и коры, пользуясь различными поправочными коэффициентами на влажность к значениям соответствующих характеристик при влажности  $W = 12\%$ .

Например, в [15] приводятся таблицы с пересчетными коэффициентами к механическим свойствам  $K_{w12}$ , зависящими от плотности древесины при влажности 12%. В [16] рекомендуется пользоваться формулой:

$$y = y_{12} \left( \frac{y_{12}}{y_{св}} \right)^{\frac{12-W}{W_p-2}}, \quad (7)$$

где  $y_{12}$  — один из механических параметров древесины при влажности 12%;  $y_{св}$  — тот же параметр для свежесрубленной древесины;  $W_p$  — влажность, ориентировочно равная точке влагонасыщения волокон (см. подробный расчет в [16]), при отсутствии данных рекомендуется принять  $W_p = 25\%$ .

Обозначим:

$$\xi = \frac{y_{12}}{y_{св}}, \quad (8)$$

$$y = y_{12} \xi^{\frac{12-W}{W_p-2}}. \quad (9)$$

Результаты расчета коэффициента  $\xi$  по данным [16] представлены в таблице.

**Таблица.** Средние значения поправочного коэффициента на влажность для оценки механических свойств древесины

Параметр	$E_{изг}$	$\sigma_{сж,a}$
$\xi_{ср,дн}$	1,2665	1,9791
$S_\xi$	0,0799	0,1808
$n$	111	112
$\Delta_\xi$	0,1583	0,3582

Примечание. В таблице обозначено:  $S$  — стандартное выборочное отклонение;  $n$  — число элементов выборки.

#### Литература

- Власов Ю.Н., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Хитров Е.Г. Анализ исследований по тематике измельчения древесных отходов // Resources and Technology. 2020. V. 17. № 1. P. 63-88.
- Коршак А.В., Бирман А.Р., Хитров Е.Г., Коркка А.А., Селимов А.М. К вопросу повышения надежности оборудования лесоперерабатывающего комплекса // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2010. № 191. С. 144-151.
- Коршак А.В., Бирман А.Р., Онегин В.И., Хитров Е.Г. Брикетирование опилок на прессах ударного типа // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2011. № 197. С. 175-181.
- Куницкая О.А., Хитров Е.Г., Ильюшенко Д.А. Уплотнение древесных материалов под действием ударной нагрузки // Научное обозрение. 2012. № 4. С. 121-127.
- Власов Ю.Н., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Хитров Е.Г. Анализ исследований по тематике прессования древесных отходов // Resources and Technology. 2020. V. 17. № 2. P. 1-22.
- Di Giacomo G, Taglieri L. Renewable energy benefits with conversion of woody residues to pellets // Energy. 2009. № 34. P. 724-731.
- Vlasov Ju., Bogatova E., Iliushenko D., Khitrov E. Study of briquetting of woodworking waste with industrial press equipment // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. Conference proceedings. SOILS; FOREST ECOSYSTEMS. Sophia, 2019. P. 829-834.
- Vlasov Ju., Khitrov E., Khakhina A., Gigorev G., Dmitrieva I. Theoretical effect of moulding speed and processing time on sawdust briquettes density // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. Conference proceedings. SOILS; FOREST ECOSYSTEMS. Sophia, 2019. P. 861-868.
- Liu Y., Wang J., Wolcott M.P. Assessing the specific energy consumption and physical properties of comminuted Douglas-fir chips for bioconversion // Ind Crops Prod. 2016. № 94. P. 394-400.
- Wimmer R., Steyrer B., Woess J., Koddenberg T., Mundigler N. 3d printing and wood // Ligno. 2015. № 11. P. 144-149.
- Ämmälä A., Karinkanta P. Fine grinding of wood-Overview from wood breakage to applications // Biomass and Bioenergy. 2018. № 113. P. 31-44.
- Власов Ю.Н., Нестерова Е.В., Хитров Е.Г. Влияние параметров рабочего органа установки и физико-механических свойств древесного сырья на показатели процесса измельчения // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2020. № 230. С. 114-125.
- Власов Ю.Н., Нестерова Е.В., Хитров Е.Г. Исследование кинетики изменения фракционного состава измельчаемого древесного сырья // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2020. № 230. С. 126-140.
- Григорьев И.В., Хитров Е.Г., Иванов В.А., Жданович В.И., Дербин М.В. Совместное влияние температуры и влажности древесины сосны на энергоемкость процесса поперечного пиления // Системы Методы Технологии. 2014. № 2 (22). С. 157-162.
- Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине. М.: Лесная пром-сть, 1989. 297 с.

16. Green D.W., Winandy J.E., Kretschmann D.E. Mechanical Properties of Wood // Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. 1024 p.
17. Grigorev I.V., Leonova O.N., Kalyashov V.A., Shvetsova V.V. Creation and experimental verification of a mathematical model of industrial debarking // Journal of Physics: Conference Series. Ser. «International Conference on Future of Engineering Systems and Technologies», 2020. P. 012021.
18. Власов Ю.Н., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Хитров Е.Г., Рунова Е.М. Моделирование физико-механических свойств сырья для производства топливных брикетов // Системы Методы Технологии. 2020. № 2 (46). С. 40-46.
19. Колесников Г.Н., Куницкая О.А., Григорьев И.В., Степанничева М.В., Борматенко А.О. Моделирование напряжений и деформаций коры длинномерных сортиментов при их изгибе // Системы Методы Технологии. 2017. № 2 (34). С. 105-108.
20. Box George E.P., Hunter William G.; Hunter J. Stuart Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery (2 ed.) // Hoboken N.J.: Wiley. 2005. 550 p.
21. Бирман А.Р., Хитров Е.Г., Угрюмов С.А., Власов Ю.Н. Совершенствование производства круглых топливных брикетов из древесных опилок // Все материалы. Энциклопедический справ. 2020. № 1. С. 41-46.
22. Хитров Е.Г., Власов Ю.Н., Угрюмов С.А. Топливные брикеты из древесных опилок и математическое описание процесса их брикетирования // Все материалы. Энциклопедический справ. 2019. № 10. С. 34-40.
- Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. Conference proceedings. SOILS; FOREST ECOSYSTEMS. Sophia, 2019. P. 861-868.
9. Liu Y., Wang J., Wolcott M.P. Assessing the specific energy consumption and physical properties of comminuted Douglas-fir chips for bioconversion // Ind Crops Prod. 2016. № 94. P. 394-400.
10. Wimmer R., Steyrer B., Woess J., Koddenberg T., Mundigler N. 3d printing and wood // Ligno. 2015. № 11. P. 144-149.
11. Ämmälä A., Karinkanta P. Fine grinding of wood-Overview from wood breakage to applications // Biomass and Bioenergy. 2018. № 113. P. 31-44.
12. Vlasov YU.N., Nesterova E.V., Hitrov E.G. The influence of the parameters of the working body of the installation and the physical and mechanical properties of wood raw materials on the indicators of the grinding process // Izvestia SPbLTA. 2020. № 230. P. 114-125.
13. Vlasov YU.N., Nesterova E.V., Hitrov E.G. Investigation of the kinetics of changes in the fractional composition of ground wood raw materials // Izvestia SPbLTA. 2020. № 230. P. 126-140.
14. Grigorev I.V., Hitrov E.G., Ivanov V.A., Zhdanovich V.I., Derbin M.V. The combined effect of temperature and humidity of pine wood on the energy consumption of the cross-sawing process // Systems Methods Technologies. 2014. № 2 (22). P. 157-162.
15. Borovikov A.M., Ugolev B.N. Timber reference. M.: Lesnaya prom-st', 1989. 297 p.
16. Green D.W., Winandy J.E., Kretschmann D.E. Mechanical Properties of Wood // Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. 1024 p.
17. Grigorev I.V., Leonova O.N., Kalyashov V.A., Shvetsova V.V. Creation and experimental verification of a mathematical model of industrial debarking // Journal of Physics: Conference Series. Ser. «International Conference on Future of Engineering Systems and Technologies», 2020. P. 012021.
18. Vlasov YU.N., Grigorev I.V., Kunickaya O.A., Hitrov E.G., Runova E.M. Modeling the physical and mechanical properties of raw materials for the production of fuel briquettes // Systems Methods Technologies. 2020. № 2 (46). P. 40-46.
19. Kolesnikov G.N., Kunickaya O.A., Grigorev I.V., Stepanishcheva M.V., Bormatenko A.O. Modeling of stresses and deformations of the bark of long timber during bending // Systems Methods Technologies. 2017. № 2 (34). P. 105-108.
20. Box George E.P., Hunter William G.; Hunter J. Stuart Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery (2 ed.) // Hoboken N.J.: Wiley. 2005. 550 p.
21. Birman A.R., Hitrov E.G., Ugryumov S.A., Vlasov YU.N. Improving the production of round fuel briquettes from sawdust // All materials: encyclopedic reference book. 2020. № 1. P. 41-46.
22. Hitrov E.G., Vlasov YU.N., Ugryumov S.A. Fuel briquettes from sawdust and mathematical description of the process of their briquetting // All materials: encyclopedic reference book. 2019. № 10. P. 34-40.

#### *References*

1. Vlasov YU.N., Grigorev I.V., Kunickaya O.A., Hitrov E.G. Analysis of research on the subject of shredding wood waste // Resources and Technology. 2020. V. 17. № 1. P. 63-88.
2. Korshak A.V., Birman A.R., Hitrov E.G., Korkka A.A., Selimov A.M. On the issue of increasing the reliability of the equipment of the timber processing complex // Izvestia SPbLTA. 2010. № 191. P. 144-151.
3. Korshak A.V., Birman A.R., Onegin V.I., Hitrov E.G. Briquetting sawdust on impact presses // Izvestia SPbLTA. 2011. № 197. P. 175-181.
4. Kunickaya O.A., Hitrov E.G., Il'yushenko D.A. Impact compaction of wood-based materials // Science Review. 2012. № 4. P. 121-127.
5. Vlasov YU.N., Grigorev I.V., Kunickaya O.A., Hitrov E.G. Analysis of research on the subject of pressing wood waste // Resources and Technology. 2020. V. 17. № 2. P. 1-22.
6. Di Giacomo G, Taglieri L. Renewable energy benefits with conversion of woody residues to pellets // Energy. 2009. № 34. P. 724-731.
7. Vlasov Ju., Bogatova E., Iliushenko D., Khitrov E. Study of briquetting of woodworking waste with industrial press equipment // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. Conference proceedings. SOILS; FOREST ECOSYSTEMS. Sophia, 2019. P. 829-834.
8. Vlasov Ju., Khitrov E., Khakhina A., Gigorev G., Dmitrieva I. Theoretical effect of moulding speed and processing time on sawdust briquettes density // 19th International