

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 62-662.3

DOI:10.18324/2077-5415-2020-2-40-46

### Моделирование физико-механических свойств сырья для производства топливных брикетов

Ю.Н. Власов<sup>1a</sup>, И.В. Григорьев<sup>2b</sup>, О.А. Куницкая<sup>2c</sup>, Е.Г. Хитров<sup>3d</sup>, Е.М. Рунова<sup>4e</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Россия

<sup>2</sup> Якутская государственная сельскохозяйственная академия, Сергеляхское шоссе, 3, Якутск, Республика Саха (Якутия)

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский, 5, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

<sup>a</sup> pobeda-872@yandex.ru, <sup>b</sup> silver73@inbox.ru, <sup>c</sup> ola.ola07@mail.ru, <sup>d</sup> yegorkhitrov@gmail.com, <sup>e</sup> runova@rambler.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4274-8493>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>,

<sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6178-4038>

Статья поступила 09.01.2020, принята 28.04.2020

*Организация эффективной утилизации и переработки отходов лесозаготовительного производства представляет собой комплексную научную проблему. Одним из основных направлений ее решения является развитие производства экологически чистого биотоплива из древесных отходов. Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике относится к приоритетным направлениям Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации. Наиболее распространенными видами биотоплива, производимого из древесных отходов, являются пеллеты и брикеты. Организация современных промышленных линий гранулирования рентабельна лишь при значительных объемах перерабатываемого сырья, недостижимых для малых лесоперерабатывающих предприятий. Требования к фракционному составу и качеству сырья более строгие по сравнению с брикетным производством. К настоящему времени разработаны модели статического прессования измельченных древесных материалов, основывающиеся на допущении о том, что скорость обработки не оказывает существенного влияния на показатели уплотнения. Такое допущение далеко не во всех случаях справедливо, поскольку на деформации материала оказывают влияние не только инерционные эффекты, которыми при статическом прессовании справедливо можно пренебречь, но и реологические свойства брикетируемого сырья, проявляющиеся и при сравнительно «медленных» режимах обработки. Характер изменения потребного давления прессования, стремительно увеличивающегося при плотности брикета свыше 1 000 кг/м<sup>3</sup>, в известных моделях передан не вполне точно, что объясняется использованием линейных выражений деформативных свойств материала брикета от плотности. Для того чтобы разработать математическую модель прессования древесного сырья, учитывающую его упруго-вязко-пластические свойства, раскрывающую их изменение в процессе уплотнения, необходима математическая модель, адекватно описывающая физико-механические свойства сырья, поступающего на брикетирование.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование; физико-механические свойства; прессование; топливные брикеты.

### Modeling of physical and mechanical properties of raw materials for the production of fuel briquettes

Yu.N. Vlasov<sup>1a</sup>, I.V. Grigorjev<sup>2b</sup>, O.A. Kunitskaya<sup>2c</sup>, E.G. Khitrov<sup>3d</sup>, E.M. Runova<sup>4e</sup>

<sup>1</sup> Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov; 8, Timiryazev St., Voronezh, Russia

<sup>2</sup> Yakutsk State Agricultural Academy; 3rd km, 3, Sergelyakhskoe Highway, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia)

<sup>3</sup> St Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov; 5, Institutsky per., St Petersburg, Russia

<sup>4</sup> Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>a</sup> pobeda-872@yandex.ru, <sup>b</sup> silver73@inbox.ru, <sup>c</sup> ola.ola07@mail.ru, <sup>d</sup> yegorkhitrov@gmail.com, <sup>e</sup> runova@rambler.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5389-7235>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>,

<sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6178-4038>

Received 09.01.2020, accepted 28.04.2020

*The organization of efficient utilization and recycling of logging waste is a complex scientific problem. One of the main directions of its solution is the development of production of environmentally friendly biofuels from wood waste. The transition to environmentally friendly and resource-saving energy is one of the priority areas of the Strategy for Scientific and Technological Development of the Russian Federation. The most common types of biofuels produced from wood waste are pellets and briquettes. The organization of mod-*

ern industrial granulation lines is profitable only when significant volumes of processed raw materials are not available for small timber processing enterprises. Requirements for the fractional composition and quality of raw materials are more stringent than in briquette production. To date, models have been developed for static pressing of crushed wood materials based on the assumption that the processing speed does not significantly affect the compaction performance. This assumption is not always true, since the deformation of the material is influenced not only by the inertial effects, which can be fairly controlled during static pressing, but also by the rheological properties of the briquetted raw material, which are also manifested in relatively «slow» processing modes. The nature of the change in the required pressing pressure, which rapidly increases when the briquette density exceeds  $1000 \text{ kg / m}^3$ , is not accurately transmitted in the known models, which is explained by the use of linear expressions of the deformative properties of the briquette material as a function of density. In order to develop a mathematical model of pressing wood raw materials, taking into account its elastic-visco-plastic properties, revealing their change in the process of compaction, a mathematical model is necessary that adequately describes the physical and mechanical properties of the raw materials coming to briquetting.

**Keywords:** mathematical modeling; physical and mechanical properties; pressing; fuel briquettes.

**Введение.** Для выработки практических рекомендаций по совершенствованию процесса производства биотоплива необходимы систематизированные сведения о деформативных свойствах сырья, с использованием которых строятся математические модели измельчения и брикетирования древесной массы. Известны результаты экспериментальных исследований процесса брикетирования с использованием штемпельных прессов и выводом зависимостей плотности брикетов от давления прессования [1]. В работах [2; 3] рассмотрены теоретические подходы к определению упругих свойств прессуемого сырья, основу подходов составляют положения механики композитов [4] и теории упругости анизотропного тела [5]. Экспериментальные данные, подтвердившие принципиальную корректность подходов, представлены в статьях [6; 7]. Вместе с тем, нелинейный характер упругих, вязких и пластических деформаций сырья, вызванных изменением его плотности при прессовании, ранее в моделях не учитывался, что снижает область практического применения полученных результатов.

**Цель работы:** уточнить взаимосвязи деформативных свойств и плотности сырья для получения древесных топливных брикетов с учетом их нелинейности.

**Материалы и методы исследования.** Используются справочные данные о физико-механических свойствах коры и древесины. Используются методы аппроксимации численных данных.

**Результаты исследования.** Древесина считается анизотропным материалом, схема анизотропии которого ортогональна. Выделяют три главных направления упругой симметрии: направление, продольное относительно волокон (1), радиальное направление (2) и тангенциальное направление (3). Для случаев, когда внешнее силовое воздействие оказывается параллельно указанным осям, матричная форма записи обобщенного закона Гука имеет вид [8]:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{zy} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{zy} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{zy}, \gamma_{zx}, \gamma_{xy}$  — деформации по направлениям главных осей упругой симметрии;  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{zy}, \tau_{zx}, \tau_{xy}$  — напряжения по главным направлениям упругой симметрии;  $a_{jk}$  — коэффициенты деформации, которые, в

свою очередь, связаны с упругими постоянными древесины уравнениями [8]:

$$\begin{cases} a_{11} = \frac{1}{E_{11}}, a_{22} = \frac{1}{E_{22}}, a_{33} = \frac{1}{E_{33}} \\ a_{12} = a_{21} = -\frac{\mu_{12}}{E_{11}} = -\frac{\mu_{21}}{E_{22}}, a_{23} = a_{32} = -\frac{\mu_{23}}{E_{22}} = -\frac{\mu_{32}}{E_{33}}, a_{13} = a_{31} = -\frac{\mu_{13}}{E_{11}} = -\frac{\mu_{31}}{E_{33}}, \\ a_{44} = \frac{1}{G_{23}}, a_{55} = \frac{1}{G_{13}}, a_{66} = \frac{1}{G_{12}} \end{cases}, \quad (2)$$

где  $E_{11}, E_{22}, E_{33}$  — модули деформации по соответствующим направлениям главных осей упругой симметрии древесины;  $\mu_{12}, \mu_{21}, \mu_{23}, \mu_{32}, \mu_{13}, \mu_{31}$  — коэффициенты Пуассона;  $G_{23}, G_{13}, G_{12}$  — модули сдвига.

Обрабатываемый материал состоит из большого числа древесных частиц, хаотично ориентированных в пространстве установки. Внешнее силовое воздействие осуществляется по осям ортогональной системы координат  $xyz$ , связанной с машиной (измельчителем либо прессом) и неподвижной в пространстве. Главные оси упругой симметрии отдельных частиц произвольно ориентированы относительно осей неподвижной системы координат. Тогда в формулировке обобщенного закона Гука, аналогичной по структуре уравнению (1), следует воспользоваться коэффициентами деформации, рассчитанными по формуле:

$$a_{jk}^i = \sum_{m=1}^6 \sum_{n=1}^6 a_{mn} q_{jm} q_{kn}. \quad (3)$$

Расшифровка вспомогательных символов  $q$  представлена в табл. 1 (номер строки здесь и далее соответствует первому нижнему индексу, номер столбца — второму).

В табл. 1  $l$  — направляющие косинусы между осями двух систем координат (исходной подвижной, оси которой соответствуют главным осям упругой симметрии древесины, и неподвижной ортогональной системы координат, оси которой связаны с пресс-формой).

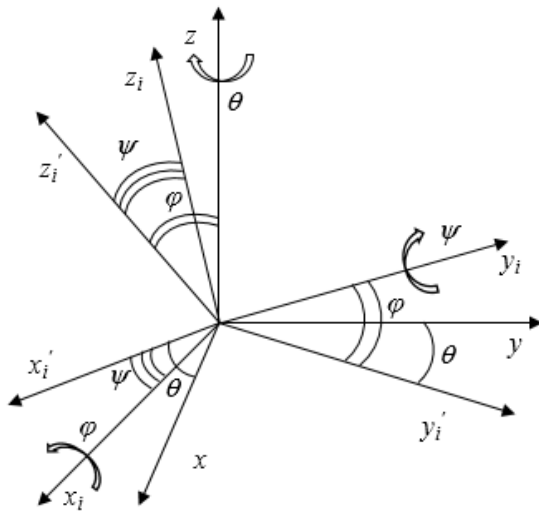
Примем, что подвижная система координат вращается относительно оси  $x$  на угол  $\theta$ , относительно оси  $z$  — на угол  $\psi$ , относительно оси  $y$  — на угол  $\varphi$ . Схема перехода от системы координат  $Oxyz$  к системе  $Ox_i y_i z_i$  представлена на рис. 2.

При повороте вокруг оси  $y$  на угол  $\theta$  ось  $x$  занимает положение  $x_i'$ , ось  $z$  — положение  $z_i'$ , ось  $y$  не меняет своего положения. Косинусы между осями координат системы  $Oxyz$  и системы  $Ox_i y_i z_i$  представим в матричном виде [8; 9]:

$$L_y = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix}. \quad (4)$$

**Таблица 1.** Символы  $q$  для пересчета коэффициентов деформации в произвольной ортогональной системе координат

	1	2	3	4	5	6
1	$l_{11}^2$	$l_{12}^2$	$l_{13}^2$	$l_{12}l_{13}$	$l_{13}l_{11}$	$l_{12}l_{11}$
2	$l_{21}^2$	$l_{22}^2$	$l_{23}^2$	$l_{23}l_{22}$	$l_{23}l_{21}$	$l_{22}l_{21}$
3	$l_{31}^2$	$l_{32}^2$	$l_{33}^2$	$l_{33}l_{32}$	$l_{33}l_{31}$	$l_{32}l_{31}$
4	$2l_{31}l_{21}$	$2l_{32}l_{22}$	$2l_{33}l_{23}$	$l_{33}l_{22} + l_{32}l_{23}$	$l_{33}l_{21} + l_{31}l_{23}$	$l_{31}l_{22} + l_{32}l_{21}$
5	$2l_{31}l_{11}$	$2l_{32}l_{12}$	$2l_{33}l_{13}$	$l_{33}l_{12} + l_{32}l_{13}$	$l_{33}l_{11} + l_{31}l_{13}$	$l_{31}l_{12} + l_{32}l_{11}$
6	$2l_{21}l_{11}$	$2l_{12}l_{22}$	$2l_{13}l_{23}$	$l_{13}l_{22} + l_{12}l_{23}$	$l_{13}l_{21} + l_{11}l_{23}$	$l_{11}l_{22} + l_{12}l_{21}$



**Рис. 2.** Схема перехода от системы координат  $Oxyz$  к системе  $Ox_iy_iz_j$

При повороте вокруг оси  $z_i$  на угол  $\varphi$  ось  $x_i$  занимает положение  $x_i$ , ось  $y$  — положение  $y_i$ , ось  $z_i$  не меняет своего положения. Косинусы между осями координат системы  $Oxyz$  и системы  $Ox_iy_iz_j$  представим в матричном виде [8; 9]:

$$L_z = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

При повороте вокруг оси  $x_i$  на угол  $\psi$  ось  $y_i$  занимает положение  $y_i$ , ось  $z_i$  — положение  $z_i$ , ось  $x_i$  не меняет своего положения. Косинусы между осями координат системы  $Oxyz$  и системы  $Ox_iy_iz_j$  представим в матричном виде [8; 9]:

$$L_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Для получения матрицы направляющих косинусов при вращении анизотропной среды вокруг трех осей упругой симметрии найдем произведение матриц:

$$L = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Тогда матрица направляющих косинусов имеет вид:

$$L = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \theta & -\sin \varphi & -\cos \varphi \sin \theta \\ \cos \psi \sin \varphi \cos \theta - \sin \psi \sin \theta & \cos \psi \cos \varphi & -\cos \psi \sin \varphi \sin \theta - \sin \psi \cos \theta \\ \sin \psi \sin \varphi \cos \theta + \cos \psi \sin \theta & \sin \psi \cos \varphi & -\sin \psi \sin \varphi \sin \theta + \cos \psi \cos \theta \end{pmatrix} \quad (8)$$

Поскольку принято допущение, что частицы древесины ориентированы в пространстве пресс-формы хаотически, математические ожидания коэффициентов деформации конгломерата древесных частиц при воздействии по осям неподвижной системы координат  $xuz$  рассчитаем по формуле [8; 9]:

$$\overline{a_{jk}} = \frac{1}{6\pi^3} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} a_{jk}^i d\varphi d\psi d\theta \quad (9)$$

Для расчета используем значения коэффициентов деформации, приведенные в работе [10].

При помощи уравнений (3), (4) и табл. 1, 2 определим коэффициенты деформации в жесткой системе координат, затем вычислим математическое ожидание коэффициентов по уравнению (5) и значения упругих постоянных по уравнению (2).

Расчеты выполнены в среде *Maple 2018*. В результате установлено, что коэффициенты  $a_{11}$ ,  $a_{22}$ ,  $a_{33}$  равны между собой, таким образом, по уравнениям (2.2),  $E_{11} = E_{22} = E_{33} = E$ . Также равны коэффициенты  $a_{12}$ ,  $a_{13}$ ,  $a_{23}$ ,  $a_{21}$ ,  $a_{31}$ ,  $a_{32}$ , кроме того, друг другу равны и коэффициенты  $a_{44}$ ,  $a_{55}$ ,  $a_{66}$ . Таким образом,  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{13}$ ,  $\nu_{23}$ ,  $\nu_{21}$ ,  $\nu_{31}$ ,  $\nu_{32} = \nu$ ,  $G_{12} = G_{13} = G_{23} = G$ .

Результаты расчетов представлены в табл. 3. Данные расчеты получены для конгломератов с плотностью, соответствующей плотности цельной древесины соответствующей породы, сведения о плотности пород древесины  $\rho$  [10] представлены в той же таблице.

Анализируя данные табл. 3, отметим, что величина модулей деформации  $E$  [МПа] и сдвига  $G$  [МПа], а также коэффициента Пуассона  $\mu$  практически точно выражается через плотность древесины  $\rho$  с помощью степенных уравнений:

$$E = a_E \rho^{b_E}, \quad (10)$$

$$G = a_G \rho^{b_G}, \quad (11)$$

$$\mu = a_\mu \rho^{b_\mu}, \quad (12)$$

где  $a$ ,  $b$  — числовые коэффициенты,  $a_E = 6\,698,8$ ;  $b_E = 3,5768$ ;  $a_G = 2\,755,5$ ;  $b_G = 3,6712$ ;  $a_\mu = 0,22$ ;  $b_\mu = -0,432$ .

**Таблица 2.** Значения коэффициентов деформации древесины,  $10^{-4}$  МПа

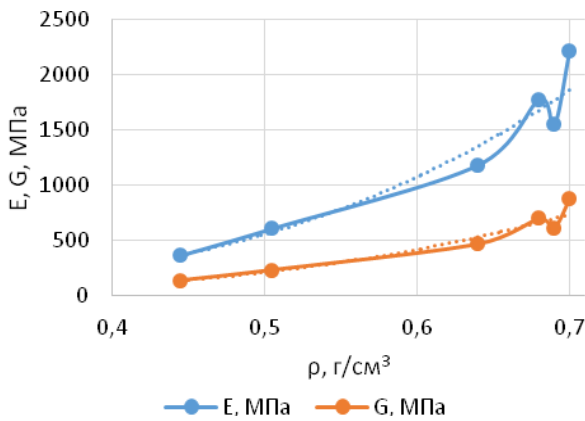
Порода	$a_{11}$	$a_{22}$	$a_{33}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{23}$	$a_{44}$	$a_{55}$	$a_{66}$
Ель	0,7042	16,9492	27,7778	-0,3922	-0,2968	-7,0315	285,7143	24,0385	15,5039
Сосна	0,8547	16,1290	20,0000	-0,3244	-0,3883	-8,5839	149,2537	14,4928	8,4746
Береза	0,6024	8,9286	15,8730	-0,2994	-0,2724	-6,4980	52,6316	9,6154	9,1324
Ясень	0,6250	6,5359	12,1951	-0,3071	-0,3301	-4,5154	36,0877	10,0000	7,6336

Порода	$a_{11}$	$a_{22}$	$a_{33}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{23}$	$a_{44}$	$a_{55}$	$a_{66}$
Бук	0,7143	4,3860	8,6207	-0,3208	-0,3718	-3,1965	21,2766	10,5263	5,0761
Дуб	0,7143	7,7519	10,9890	-0,4249	-0,6409	-5,0852	22,7273	10,9890	7,5758

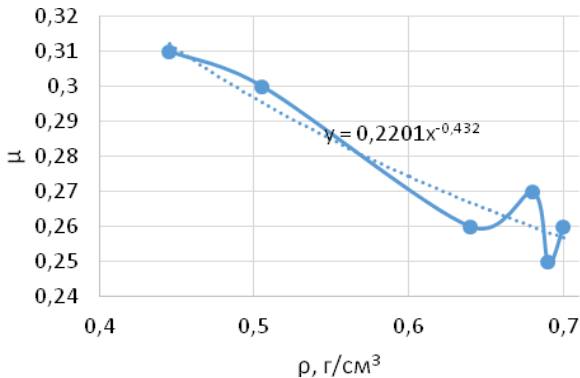
**Таблица 3.** Результаты расчета модуля упругости и сдвига, коэффициентов Пуассона конгломератов древесных частиц с плотностью цельной древесины

Порода древесины	$\rho, \text{г/см}^3$	$E, \text{МПа}$	$\mu$	$G, \text{МПа}$
Ель	0,445	367	0,31	140
Сосна	0,505	611	0,3	235
Береза	0,640	1 188	0,26	471
Бук	0,680	1 783	0,27	703
Дуб	0,700	2 220	0,26	879
Ясень	0,690	1 553	0,25	621

Графические зависимости (10), (11), (12) представлены на рис. 2 и 3.



**Рис. 2.** Взаимосвязь плотности, модуля деформации и модуля сдвига конгломерата прессуемых древесных частиц



**Рис. 3.** Взаимосвязь плотности и коэффициента Пуассона конгломерата прессуемых древесных частиц

Далее повторим вычисления, но уже для пределов прочности древесины при сжатии и разрыве, в качестве основы используем данные, представленные в табл. 4.

**Таблица 4.** Пределы прочности древесины при растяжении и разрыве по направлениям симметрии прочности, МПа

Порода	При растяжении			При сжатии		
	$\sigma_{сж, a}$	$\sigma_{сж, r}$	$\sigma_{сж, t}$	$\sigma_{p, a}$	$\sigma_{p, r}$	$\sigma_{p, t}$
Ель	100	4,8	3,0	39	–	–
Сосна	103	4,8	4,8	45	3,6	6,7
Береза	169	10,9	6,9	77	12,3	6,5
Бук	118	12,1	7,9	47,5	7,8	5,2
Дуб	–	7,7	6,0	51	7,6	5,6
Ясень	139	8,7	6,7	50	9,0	9,9

Результаты расчетов представлены в табл. 5.

Анализ табличных данных показывает, что пределы прочности на сжатие и разрыв при хаотическом ориентировании древесных частиц также связаны с их плотностью:

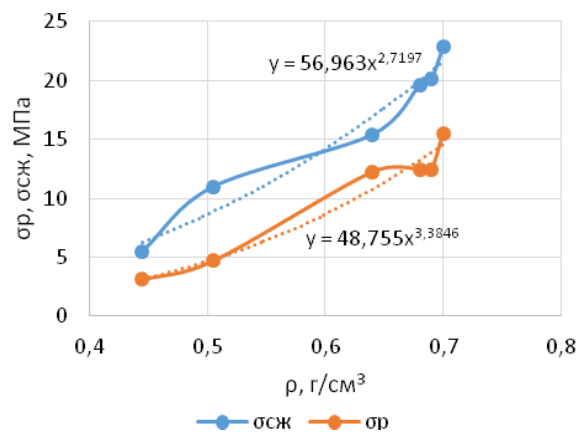
$$\sigma_{сж} = a_{сж} \rho^{b_{сж}}, \quad (13)$$

$$\sigma_p = a_{op} \rho^{b_{op}}, \quad (14)$$

где  $a, b$  — числовые коэффициенты,  $a_{сж} = 56,963$ ;  $b_{сж} = 2,7197$ ;  $a_{op} = 48,755$ ;  $b_{op} = 3,3846$ .

**Таблица 5.** Результаты расчета пределов прочности при сжатии и разрыве хаотически ориентированных древесных частиц

Порода древесины	$\rho, \text{г/см}^3$	$\sigma_{сж}$	$\sigma_p$
Ель	0,445	5,51	3,14
Сосна	0,505	11	4,72
Береза	0,640	15,44	12,26
Бук	0,680	19,61	12,48
Дуб	0,700	20,19	12,42
Ясень	0,690	22,87	15,54



**Рис. 4.** Взаимосвязь пределов прочности на сжатие и на разрыв от плотности хаотически ориентированных древесных частиц

Сопоставляя уравнения (10), (13), (14), отметим, что пределы прочности тесно связаны с модулем деформации E:

$$\sigma_{сж} = \xi_{сж} E, \quad (15)$$

$$\sigma_p = \xi_p E, \quad (16)$$

где  $\xi$  — коэффициенты пропорциональности,  $\xi_{сж} = 0,0116$ ;  $\xi_p = 0,0076$ .

Уравнения (15), (16) проиллюстрированы на рис. 5.

Дополнительные параметры, характеризующие механические свойства разрушаемого обрабатываемого древесного материала, определим согласно [11]. Для удельного сцепления частиц  $C$  и угла внутреннего трения  $\varphi$  запишем:

$$C = \frac{\sigma_{сж} \cdot \sigma_p}{\sigma_{сж} + \sigma_p}, \quad (17)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\sigma_{сж} - \sigma_p}{\sigma_{сж} + \sigma_p}, \quad (18)$$

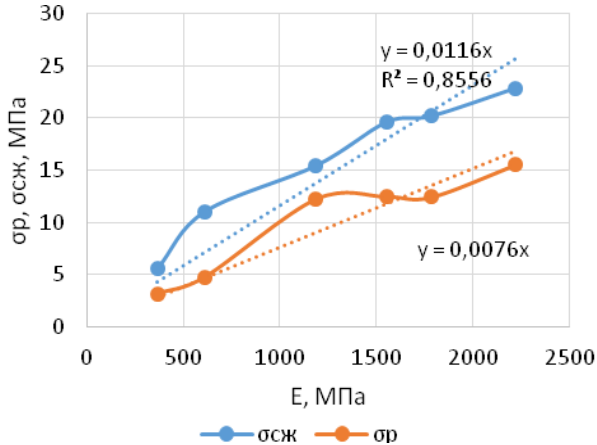


Рис. 5. Взаимосвязь пределов прочности на сжатие и на разрыв от модуля деформации древесных частиц

Физико-механические свойства коры и древесины различных пород представлены в табл. 5 и 6.

К сожалению, анизотропия физико-механических свойств коры исследована не так подробно, как древесины. Тем не менее, получены вероятностные оценки пределов прочности коры в зависимости от ее плотности. Результаты представлены в табл. 6.

Таблица 6. Оценка прочности древесной коры

Порода древесины	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_{сж}$	$\sigma_p$
Сосна	370	6,4	1,8
Ель	310	4,2	2,6
Лиственница	380	3,9	1,7
Пихта	470	4	2,4
Дуб	480	8,2	5,2
Береза	770	20	10,7
Осина	590	12,5	6,2

Связь пределов прочности коры с плотностью проиллюстрирована на рис. 6.

Анализ данных показывает, что оценки пределов прочности коры на сжатие и на разрыв связаны с ее плотностью:

$$\sigma_{сж(\kappa)} = a_{\sigma_{сж(\kappa)}} \rho^{b_{\sigma_{сж(\kappa)}}}, \quad (19)$$

$$\sigma_{p(\kappa)} = a_{\sigma_{p(\kappa)}} \rho^{b_{\sigma_{p(\kappa)}}}, \quad (20)$$

где  $a$ ,  $b$  — числовые коэффициенты,  $a_{\sigma_{сж(\kappa)}} = 27,859$ ;  $b_{\sigma_{сж(\kappa)}} = 1,779$ ;  $a_{\sigma_{p(\kappa)}} = 16,221$ ;  $b_{\sigma_{p(\kappa)}} = 1,9795$ .

Ориентировочное значение модуля деформации коры получим на основе ранее выполненных экспериментов:

$$E_{(\kappa)} = 0,265 E, \quad (21)$$

где  $E$  — модуль деформации древесины при плотности, равной плотности коры, для которой рассчитывается модуль  $E_{(\kappa)}$ .

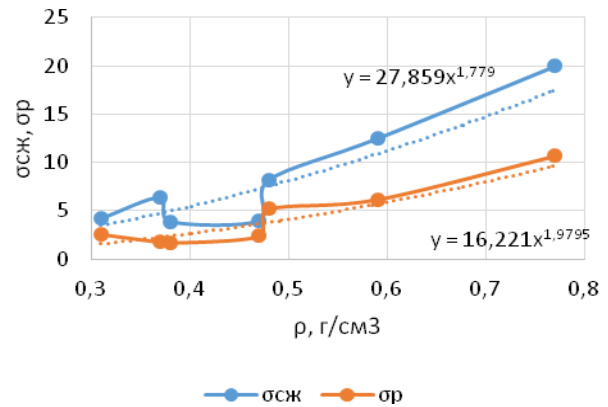


Рис. 6. Связь пределов прочности коры на сжатие и на разрыв с плотностью

Согласно данным табл. 3, модуль сдвига для древесины пропорционален модулю деформации. Примем это же допущение и для коры, тогда модуль сдвига ее рассчитаем по уравнению (19), где значение модуля  $E_{op}$  заменим на  $G_{op}$ .

$$E_{(\kappa)} = a_{E(\kappa)} \rho^{b_{E(\kappa)}}, \quad (22)$$

$$G_{(\kappa)} = a_{G(\kappa)} \rho^{b_{G(\kappa)}}, \quad (23)$$

где  $a$ ,  $b$  — числовые коэффициенты,  $a_{E(\kappa)} = 1\,775,2$ ;  $b_{E(\kappa)} = 3,5768$ ;  $a_{G(\kappa)} = 730,21$ ;  $b_{G(\kappa)} = 3,6712$ .

Расчеты с использованием (22), (23) и известного уравнения теории упругости:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 - \mu)} \quad (24)$$

показывают, что коэффициент Пуассона связан с плотностью коры уравнением:

$$\mu_{(\kappa)} = a_{\mu(\kappa)} \rho^{b_{\mu(\kappa)}}, \quad (25)$$

где  $a$ ,  $b$  — числовые коэффициенты,  $a_{\mu(\kappa)} = 0,2225$ ;  $b_{\mu(\kappa)} = -0,412$ .

На основании (19), (20), (22) после аппроксимации получим выражения для пределов прочности коры при сжатии и при разрыве от модуля деформации:

$$\sigma_{сж(\kappa)} = \xi_{сж(\kappa)} E_{(\kappa)}, \quad (26)$$

$$\sigma_{p(\kappa)} = \xi_{p(\kappa)} E_{(\kappa)}, \quad (27)$$

где  $\xi$  — числовые коэффициенты,  $\xi_{сж(\kappa)} = 0,0327$ ;  $\xi_{p(\kappa)} = 0,0174$ .

Для удобства сведем все полученные значения коэффициентов  $a$ ,  $b$  для оценок механических свойств конгломератов частиц древесины по уравнениям (10) – (14) и коры по уравнениям (19) – (23), (25) в табл. 7. Коэффициенты пропорциональности пределов прочности от модулей деформации в уравнениях (15), (16) для древесины и (26), (27) для коры представим в табл. 8.

**Таблица 7.** Коэффициенты для приближенной оценки механических параметров конгломератов хаотически ориентированных частиц древесины и коры по их плотности

Параметр	Древесина		Кора	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
<i>E</i> , МПа	6 698,8	3,58	1 775,2	3,58
<i>G</i> , МПа	2 755,5	3,67	730,2	3,67
<i>m</i>	0,22	−0,43	0,22	−0,41
<i>У<sub>сжс</sub></i> , МПа	56,97	2,72	27,86	1,78
<i>У<sub>р</sub></i> , МПа	48,75	3,38	16,22	1,98

**Таблица 8.** Коэффициенты для приближенной оценки прочностных параметров хаотически ориентированных частиц древесины и коры по их модулю деформации

Параметр	Древесина	Кора
<i>У<sub>сжс</sub></i> , МПа	0,0116	0,0327
<i>У<sub>р</sub></i> , МПа	0,0076	0,0174

**Таблица 9.** Физико-механические свойства коры (частицы хаотически ориентированы в пространстве)

Порода древесины	$\sigma_{сжс}$ , МПа	$\sigma_p$ , МПа	<i>E</i> , МПа	<i>G</i> , МПа	$\mu$	<i>C</i> , МПа	$\varphi$ , °
Сосна	4,75	2,27	50,7	19,0	0,33	1,53	19,5
Ель	3,46	1,60	26,9	9,9	0,36	1,09	20,3
Лиственница	4,98	2,39	55,7	20,9	0,33	1,61	19,4
Пихта	7,27	3,64	119,2	45,7	0,31	2,42	18,4
Дуб	7,54	3,79	128,5	49,3	0,30	2,52	18,3
Береза	17,50	9,67	696,9	279,7	0,25	6,23	16,1

#### Литература

- Бажанов Е.А. Брикетирование древесных отходов. Деревообрабатывающая промышленность. 1996. № 4. С. 16–18.
- Базаров С.М., Белокобыльский С.В., Куницкая О.А. К уплотнению материала древесины путем ее прессования. Системы. Методы. Технологии, 2011. № 2, С.107–108.
- Бастриков Д.В. Повышение энергоэффективности измельчения отходов окорки на оборудовании с ножевым рабочим органом: дис. ... канд. техн. наук. ВГЛТУ, 2018. 118 с.
- Кристенсен Р. Введение в механику композитов. М.: Мир, 1982. 334 с.
- Ашкенази Е.К., Ганов Э.В. Анизотропия конструкционных материалов: справ. Л.: Машиностроение, 1980. 247 с.
- Бастриков Д.В., Власов Ю.Н., Кучер С.В. Исследование энергоёмкости измельчения отходов окорки установкой с ножевым рабочим органом // Лесотехнический журнал. 2018. Т. 8. № 1. С. 120–128.
- Бастриков Д.В., Власов Ю.Н., Чибирев О.В. Результаты предварительных экспериментов по дроблению коры сосны // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2016. Т. 4. № 1 (21). С. 63–66.
- Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопrotивление материалов: учеб. для вузов. 2-е изд., испр. М.: Высш. шк., 2000. 560 с.
- Анохин Н.Н. Строительная механика в примерах и зада-

Порода древесины	$\sigma_{сжс}$ , МПа	$\sigma_p$ , МПа	<i>E</i> , МПа	<i>G</i> , МПа	$\mu$	<i>C</i> , МПа	$\varphi$ , °
Осина	10,89	5,71	268,9	105,2	0,28	3,74	17,4

**Таблица 10.** Физико-механические свойства древесины (частицы хаотически ориентированы в пространстве)

Порода древесины	$\sigma_{сжс}$ , МПа	$\sigma_p$ , МПа	<i>E</i> , МПа	<i>G</i> , МПа	$\mu$	<i>C</i> , МПа	$\varphi$ , °
Сосна	8,88	4,83	581,7	224,3	0,29	3,13	16,5
Ель	6,30	3,15	370,0	141,0	0,31	1,61	18,5
Лиственница	9,62	5,33	645,9	249,8	0,29	1,18	16,0
Пихта	7,31	3,79	449,9	172,3	0,30	1,50	17,6
Дуб	21,59	14,58	1 870,2	743,9	0,26	4,04	11,0
Береза	16,92	10,77	1 357,3	535,4	0,27	1,98	12,5
Осина	5,74	2,80	327,3	124,3	0,31	5,77	19,0

Для справки приведены оценки значений механических свойств древесины, частицы которой ориентированы и подвергаются силовому воздействию в произвольном направлении (табл. 10), в табл. 9 — те же данные для коры.

Полученные уравнения модулей, коэффициентов Пуассона и пределов прочности далее возможно использовать при составлении математической модели уплотнения конгломерата древесных частиц, а также при изучении энергоёмкости процесса производства топливных брикетов из древесины и коры.

чах. Ч. 2. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2007. 464 с.

- Бастриков Д.В., Власов Ю.Н., Кучер С.В., Куницкая Д.Е. Экспериментальные исследования энергоёмкости дробления отходов окорки ели // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2016. № 217. С. 81–90.
- Газизов А.М., Григорьев И.В., Кацадзе В.А., Шапиро В.Я., Мурашкин Н.В. Повышение эффективности механической окорки круглых лесоматериалов. СПб.: Изд-во ЛТА, 2009. 240 с.

#### References

- Bazhanov E.A. Briquetting of wood waste // *Derevoobrabatvaushaya promishlennost'* (Woodworking industry). 1996. № 4. P. 16–18.
- Bazarov S.M., Belokobyl'skij S.V., Kunickaya O.A. To compaction of wood material by pressing it // *Systems. Methods. Technologies*. 2011. №2. P. 107–108.
- Bastrikov D.V. Improving the energy efficiency of shredding debarking waste on equipment with a knife working body: dis. ... kand. tekhn. nauk. VGLTU, 2018. 118 p.
- Kristensen R. Introduction to the mechanics of composites. M.: Mir, 1982. 334 p.
- Ashkenazi E.K., Ganov E.V. Anisotropy of structural materials: sprav. L.: Mashinostroenie, 1980. 247 p.
- Bastrikov D.V., Vlasov YU.N., Kucher S.V. Investigation of the energy intensity of shredding of okorki waste by a plant

- with a knife working body. *Lesotekhnicheskij zhurnal*. 2018. V. 8. № 1. P. 120–128.
7. Bastrikov D.V., Vlasov YU.N., CHibirev O.V. Results of preliminary experiments on crushing pine bark. Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2016. V. 4. № 1 (21). P. 63–66.
  8. Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. Resistance of materials: ucheb. dlya vuzov. 2-e izd., ispr. M.:Vyssh. shk., 2000. 560 p.
  9. Anohin N.N. Construction mechanics in applications and problems. Ch. 2. M.: Izd-vo Associacii stroitel'nyh vuzov, 2007. 464 p.
  10. Bastrikov D.V., Vlasov YU.N., Kucher S.V., Kunickaya D.E. Experimental study of the intensity of crushing waste debarking spruce // *Izvestia SPbLTA*. 2016. № 217. P. 81–90.
  11. Gazizov A.M., Grigor'ev I.V., Kacadze V.A., SHapiro V.YA., Murashkin N.V. Increasing the efficiency of mechanical debarking of round timber territories. SPb.: Izd-vo LTA, 2009. 240 p.