

Оценка упругих свойств конгломерата древесных частиц

О.В. Чиби́рев^а, Ю.Н. Власов^б, С.В. Кучер^с, О.А. Куницкая^д

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский 5, Санкт-Петербург, Россия

^аolegchibirev@yandex.ru, ^бgnvlasov@yandex.ru, ^сsuroga.kucher@gmail.com, ^дola.ola07@mail.ru

Статья поступила 8.01.2017, принята 11.02.2017

В работе представлены зависимости для расчета модуля упругости, модуля сдвига и коэффициента Пуассона прессуемых древесных опилок. Прессуемый материал рассмотрен как конгломерат древесных частиц, хаотически ориентированных в пространстве пресс-формы. Для оценки его упругих свойств использованы методы осреднения Фойгта и Ройсса. Для получения результатов использованы справочные данные о значениях коэффициентов деформации (элементы матрицы податливости) и о физических модулях упругости (элементы матрицы упругости) основных пород древесины в направлении главных осей упругой симметрии (продольное направление относительно волокон, радиальное и тангенциальное направления). На первом этапе получены оценки упругих постоянных для конгломератов с плотностью цельной древесины (поскольку при расчете осредненных значений упругих постоянных использованы значения упругих постоянных цельной древесины). Осредненные коэффициенты податливости вычислены как математические ожидания коэффициентов податливости при предположении о хаотическом разбросе частиц в пространстве пресс-формы (метод Ройсса, базирующийся на предположении о том, что напряженное состояние частицы в каждой точке совпадает с напряженным состоянием конгломерата). Осредненные коэффициенты упругости вычислены как математические ожидания элементов матрицы упругости при предположении о разбросе частиц в пространстве пресс-формы (метод Фойгта, основанный на предположении о том, что деформации частицы совпадают с деформациями конгломерата). Установлено равенство значений технических модулей и коэффициентов Пуассона, а также физических коэффициентов податливости и упругости конгломератов древесных частиц. На втором этапе сопоставлены осредненные технические упругие постоянные конгломератов частиц древесины различных пород с плотностью древесины. По результатам получены зависимости осредненного модуля упругости конгломерата древесных частиц от плотности цельной древесины и осредненного модуля сдвига конгломерата древесных частиц от плотности цельной древесины. Расчетные данные с удовлетворительной точностью аппроксимированы линейными функциями. Также приводятся формулы для расчета коэффициента Пуассона конгломерата древесных частиц в зависимости от плотности.

Ключевые слова: модуль упругости; модуль сдвига; коэффициент Пуассона; конгломерат древесных частиц.

Evaluation of elastic properties of wood particles conglomerate

O.V. Chibirev^a, Ju.N. Vlasov^b, S.V. Kucher^c, O.A. Kunitckaya^d

St. Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov, 5, Institutsky per., St. Petersburg, Russia

^aolegchibirev@yandex.ru, ^bgnvlasov@yandex.ru, ^csuroga.kucher@gmail.com, ^dola.ola07@mail.ru

The article was received 8.01.2017, adopted 11.02.2017

The paper presents the dependences for calculation of the elastic modulus, shear modulus and Poisson's ratio of pressed sawdust. The paper considers pressed material as a conglomerate of wood particles, randomly oriented in mold space. To assess its elastic properties, the authors use Voigt and Reuss estimation methods. The paper uses the results of the reference data on the values of the strain coefficients (elements of the compliance matrix) and physical elastic moduli (elastic matrix elements) of the main species of wood in the direction of the principal axes of elastic symmetry (longitudinal direction of the fibers, radial direction and tangential direction) as a basis. At the first stage of evaluation of the elastic constants, the results obtained for conglomerates with a density of solid wood (because when calculating the average values of the elastic constants, the values of the elastic constants of solid wood are used). Estimated coefficients of compliance calculated as expectations of compliance coefficients under the assumption of random scatter particles in the mold space (Reuss method, which bases on the assumption that the stressed state of the particle at each point coincides with the stressed state of the conglomerate). Estimated coefficients of elasticity are calculated as the expectations of elasticity matrix elements under the assumption of random scatter particles in the mold space (Voigt method, which bases on the assumption that the particles have the same strain with the conglomerate). The results establish the equality of values of technical modules and Poisson's ratios, as well as physical coefficients of compliance and elasticity of wood particles conglomerate. At the second stage, the paper compares estimated engineering elastic constants of wood particles conglomerate of different species with a density of the wood species. Basing on the comparing results, the paper obtains relationships of elastic modulus and shear modulus of wood particles conglomerate from the solid wood density. The calculated data approximated by linear functions with reasonable accuracy. The paper also provides a formula for the calculation of Poisson's ratio for wood particles conglomerate depending on the density.

Keywords: elastic modulus; shear modulus; Poisson's ratio; wood particles conglomerate.

Введение

Способ утилизации сыпучих древесных отходов путем производства топливных брикетов находит все большее применение в промышленности [1; 2]. Из фундаментальных работ в этой области следует упомянуть монографию 1971-го года [3]. Очевидно, что промышленность за это время сделала шаг вперед, например появились новые марки прессов, кроме того, изменились социально-экономические условия. Важной теоретической задачей, решение которой будет способствовать дальнейшему совершенствованию процесса брикетирования, является оценка упругих свойств прессуемого материала — конгломерата древесных частиц. Подобные задачи решались ранее для случая прессования пеллет на оборудовании с открытой матрицей [4]. Сведений, опубликованных для случая брикетирования опилок в закрытой матрице, на сегодняшний день недостаточно.

Цель работы: получение зависимостей для расчета модуля упругости, модуля сдвига и коэффициента Пуассона конгломерата древесных частиц в зависимости от плотности.

Материалы и методы исследования. Использованы справочные данные об упругих свойствах древесины. Расчеты выполнены на основе положений теории упругости анизотропного тела. Использованы методы осреднения Фойгта и Ройсса, методы аппроксимации численных данных.

Результаты исследования. Древесину принято рассматривать как материал с ортогональной схемой анизотропии упругих свойств с главными осями упругой симметрии a (1) (продольное направление относительно волокон), r (2) (радиальное направление) и t (3) (тангенциальное направление) [5]. При силовых воздействиях по направлениям этих осей зависимость между напряжениями и деформациями записывается в виде обобщенного закона Гука [5]. В матричной форме закон записывается следующим образом:

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

где $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{zy}, \gamma_{zx}, \gamma_{xy}$ — составляющие деформаций в направлении главных осей упругой симметрии; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{zy}, \tau_{zx}, \tau_{xy}$ — составляющие напряжений в направлении главных осей упругой симметрии; a_{jk} — физические упругие постоянные древесины в главных направлениях упругой симметрии (физические коэффициенты деформации).

Коэффициенты a_{jk} связаны с техническими упругими постоянными следующими формулами [5]:

$$\left\{ \begin{aligned} a_{11} &= \frac{1}{E_{11}} = \frac{1}{E_a}, a_{22} = \frac{1}{E_{22}} = \frac{1}{E_r}, a_{33} = \frac{1}{E_{33}} = \frac{1}{E_t} \\ a_{12} &= a_{21} = -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} = -\frac{\nu_{21}}{E_{22}} = -\frac{\nu_{ar}}{E_a} = -\frac{\nu_{ra}}{E_r} \\ a_{23} &= a_{32} = -\frac{\nu_{23}}{E_{22}} = -\frac{\nu_{32}}{E_{33}} = -\frac{\nu_{rt}}{E_r} = -\frac{\nu_{tr}}{E_t} \\ a_{13} &= a_{31} = -\frac{\nu_{13}}{E_{11}} = -\frac{\nu_{31}}{E_{33}} = -\frac{\nu_{at}}{E_a} = -\frac{\nu_{ta}}{E_t} \\ a_{44} &= \frac{1}{G_{23}} = \frac{1}{G_{rt}}, a_{55} = \frac{1}{G_{13}} = \frac{1}{G_{at}}, a_{66} = \frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{G_{ar}} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где $E_{11} = E_a, E_{22} = E_r, E_{33} = E_t$ — модули продольной упругости в направлении главных осей упругой симметрии; $\nu_{12} = \nu_{ar}, \nu_{21} = \nu_{ra}, \nu_{23} = \nu_{rt}, \nu_{32} = \nu_{tr}, \nu_{13} = \nu_{at}, \nu_{31} = \nu_{ta}$ — коэффициенты Пуассона, характеризующие поперечную деформацию в направлении оси, соответствующей первому индексу, от усилия, действующего по оси, соответствующей второму индексу; $G_{23} = G_{rt}, G_{13} = G_{at}, G_{12} = G_{ar}$ — модули сдвига в плоскостях, соответствующих индексам.

Закон Гука также представляют в форме, связывающей напряжения с деформациями [5]. В матричной форме формулировку закона записывают следующим образом [5]:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{zy} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & 0 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & 0 & 0 & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{zy} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (3)$$

где A_{jk} — физические модули упругости.

Кроме того, следует отметить, что физические коэффициенты деформации и модули упругости связаны между собой, поскольку являются элементами взаимно обратных матриц.

Значения физических и технических модулей упругости, коэффициентов Пуассона, а также физических коэффициентов деформации представлены в табл. 1, 2.

При переходе от одной системы координат к другой упругие свойства анизотропного материала в новой системе координат рассчитываются по специальным формулам, доказательство которых подробно изложено в работе [6]. Кратко изложим основные зависимости, необходимые для расчетов в нашем исследовании.

Зададимся ортогональной системой координат $Oxyz$, жестко связанной с прессуемым материалом. Кроме того, для i -й частицы введем подвижную ортогональную систему координат $Ox_iy_iz_i$, оси которой совпадают с направлениями упругой симметрии частицы. Схема перехода от системы координат $Oxyz$ к системе $Ox_iy_iz_i$ представлена на рис. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов деформации (элементов матрицы податливости) основных пород древесины, 10^{-4} МПа [5]

Коэффициент	Порода					
	Ель	Сосна	Береза	Ясень	Бук	Дуб
a_{11}	0,7042	0,8547	0,6024	0,6250	0,7143	0,7143
a_{22}	16,9492	16,1290	8,9286	6,5359	4,3860	7,7519
a_{33}	27,7778	20,0000	15,8730	12,1951	8,6207	10,9890
a_{12}	-0,3922	-0,3244	-0,2994	-0,3071	-0,3208	-0,4249
a_{13}	-0,2968	-0,3883	-0,2724	-0,3301	-0,3718	-0,6409
a_{23}	-7,0315	-8,5839	-6,4980	-4,5154	-3,1965	-5,0852
a_{44}	285,7143	149,2537	52,6316	36,0877	21,2766	22,7273
a_{55}	24,0385	14,4928	9,6154	10,0000	10,5263	10,9890
a_{66}	15,5039	8,4746	9,1324	7,6336	5,0761	7,5758

Таблица 2

Значение физических модулей упругости (элементов матрицы упругости) основных пород древесины в направлении главных осей упругой симметрии, МПа [5]

Коэффициент	Порода					
	Ель	Сосна	Береза	Ясень	Бук	Дуб
a_{11}	14 563	12 080	17 519	17 296	15 810	17 227
a_{22}	673	822	1 671	2 191	3 449	2 160
a_{33}	407	664	931	1 164	1 736	1 555
a_{12}	449	477	1 148	1 527	2 266	2 302
a_{13}	269	439	771	1 033	1 522	2 070
a_{23}	175	362	704	852	1 377	1 134
a_{44}	35	67	190	277	470	440
a_{55}	416	690	1 040	1 000	950	910
a_{66}	645	1 180	1 095	1 310	1 970	1 320

При повороте вокруг оси y на угол θ 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:

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

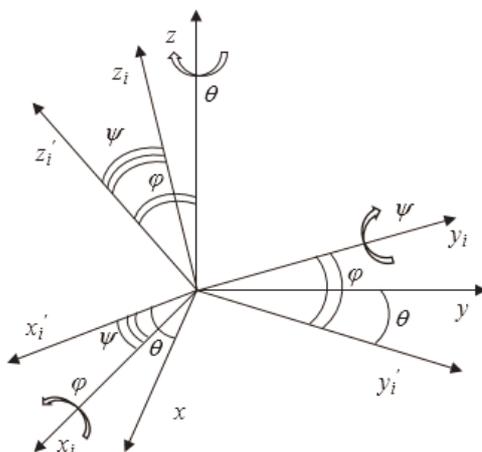


Рис. 1. Схема перехода от системы координат $Oxyz$ к системе $Ox_i'y_i'z_i'$

При повороте вокруг оси z_i' на угол φ 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 $Ox_i'y_i'z_i'$ представим в матричном виде:

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

При повороте вокруг оси x_i на угол ψ 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 $Ox_i'y_i'z_i'$ представим в матричном виде:

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

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

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

В итоге получим следующую матрицу направляющих косинусов:

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

Располагая матрицей направляющих косинусов, элементы матрицы податливости и матрицы упругости при переходе от подвижной системы к жесткой определим по формулам [6]:

$$a_{jk}^i = \sum_{m=1}^6 \sum_{n=1}^6 a_{mn} q_{jm} q_{kn} \quad (9)$$

$$A_{jk}^i = \sum_{m=1}^6 \sum_{n=1}^6 A_{mn} q_{jm} q_{kn} \quad (10)$$

Символы q введены для удобства записи, их расшифровка представлена в табл. 3.

Таблица 3

Символы q для расчета элемента матриц упругости и податливости при смене системы координат [6]

Для пересчета элементов матрицы податливости						
	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	$2l_{21}l_{11}$	$2l_{12}l_{22}$	$2l_{13}l_{23}$	$l_{13}l_{22} + l_{12}l_{23}$	$l_{13}l_{21} + l_{11}l_{23}$	$l_{11}l_{22} + l_{12}l_{21}$
Для пересчета элементов матрицы упругости						
	1	2	3	4	5	6
1	l_{11}^2	l_{12}^2	l_{13}^2	$2l_{12}l_{13}$	$2l_{13}l_{11}$	$2l_{12}l_{11}$
2	l_{21}^2	l_{22}^2	l_{23}^2	$2l_{23}l_{22}$	$2l_{23}l_{21}$	$2l_{22}l_{21}$
3	l_{31}^2	l_{32}^2	l_{33}^2	$2l_{33}l_{32}$	$2l_{33}l_{31}$	$2l_{32}l_{31}$
4	$l_{31}l_{21}$	$l_{32}l_{22}$	$l_{33}l_{23}$	$l_{33}l_{22} + l_{32}l_{23}$	$l_{33}l_{21} + l_{31}l_{23}$	$l_{31}l_{22} + l_{32}l_{21}$
5	$l_{31}l_{11}$	$l_{32}l_{12}$	$l_{33}l_{13}$	$l_{33}l_{12} + l_{32}l_{13}$	$l_{33}l_{11} + l_{31}l_{13}$	$l_{31}l_{12} + l_{32}l_{11}$
6	$l_{21}l_{11}$	$l_{12}l_{22}$	$l_{13}l_{23}$	$l_{13}l_{22} + l_{12}l_{23}$	$l_{13}l_{21} + l_{11}l_{23}$	$l_{11}l_{22} + l_{12}l_{21}$

Примечание: l_{jk} — направляющие косинусы

Прессуемый материал рассмотрим как конгломерат древесных частиц, хаотически ориентированных в трехмерном пространстве. Для оценки его упругих свойств пользуются методами осреднения, описанными в (Поздняков).

Ранее осредненные упругие свойства прессуемой древесной массы определяли в работах [5; 7; 8], однако численные решения получены только для случаев прессования частиц, хаотически ориентированных в плоскости, нормальной к направлению усилия прессования.

Первый из наиболее распространенных методов — метод Ройсса. В его основе лежит предположение о том, что напряженное состояние частицы в каждой точке совпадает с напряженным состоянием конгломерата [5]:

$$\sigma_{jk} = \sigma_{jk}^i \quad (11)$$

При этом деформации конгломерата связаны с напряжениями системой уравнений:

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

где $\overline{a_{jk}}$ — осредненные коэффициенты податливости.

Осредненные коэффициенты податливости вычислим, полагая разброс частиц равномерным в пределах углов поворота φ, θ, ψ , как математические ожидания [5]:

$$\overline{a_{jk}} = \frac{1}{6\pi^3} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} a_{jk}^i d\varphi d\psi d\theta \quad (13)$$

Второй из методов — метод Фойгта. В его основе лежит предположение о том, что деформации частицы совпадают с деформациями конгломерата [5]:

$$\epsilon_{jk} = \epsilon_{jk}^i \quad (14)$$

При этом связь между напряженным и деформированным состоянием конгломерата частиц запишем в виде уравнения:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{zy} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{A_{11}} & \overline{A_{12}} & \overline{A_{13}} & 0 & 0 & 0 \\ \overline{A_{21}} & \overline{A_{22}} & \overline{A_{23}} & 0 & 0 & 0 \\ \overline{A_{31}} & \overline{A_{32}} & \overline{A_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \overline{A_{44}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \overline{A_{55}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \overline{A_{66}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{zy} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (15)$$

где $\overline{A_{jk}}$ — осредненные коэффициенты упругости.

Осредненные коэффициенты упругости вычислим, полагая разброс частиц равномерным в пределах углов поворота ϕ, θ, ψ , как математические ожидания [5]:

$$\overline{A_{jk}} = \frac{1}{6\pi^3} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} A_{jk}^i d\phi d\psi d\theta \quad (17)$$

Вычисления выполним с использованием значений упругих постоянных по табл. 1, 2. Расчет проведен в программе *Maple 2015*. Результаты вычислений представлены в табл. 4, 5.

Таблица 4

Осредненные коэффициенты матрицы податливости (осреднение Ройсса), 10^{-4} МПа

Порода	$a_{11} = a_{22} = a_{33}$	$a_{12} = a_{13} = a_{23} = a_{21} = a_{31} = a_{32}$	$a_{44} = a_{55} = a_{66}$
Ель	29,7406	-9,8719	79,2251
Сосна	17,6386	-5,7542	46,7856
Береза	8,8968	-2,5710	22,9356
Ясень	6,4232	-2,5591	17,9647
Бук	4,6842	-1,3517	12,0717
Дуб	5,8230	-1,7193	15,0879

Таблица 5

Осредненные коэффициенты матрицы упругости (осреднение Фойгта), МПа

Порода	$A_{11} = A_{22} = A_{33}$	$A_{12} = A_{13} = A_{23} = A_{21} = A_{31} = A_{32}$	$A_{44} = A_{55} = A_{66}$
Ель	502	249	126
Сосна	829	401	214
Береза	1 469	597	436
Ясень	3 296	2 183	557
Бук	2 787	1 130	828
Дуб	2 282	956	663

Осредненные технические упругие постоянные вычисляются либо с использованием коэффициентов по

табл. 4 и формул (2), либо с использованием коэффициентов по табл. 5 и формул (2), предварительно обратив матрицу упругости (результаты вычислений полностью совпадают и представлены в табл. 6).

Таблица 6

Осредненные технические упругие постоянные конгломерата частиц древесины

Порода	$E_{11} = E_{22} = E_{33}$, МПа	$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23} = \nu_{21} = \nu_{31} = \nu_{32}$	$G_{12} = G_{13} = G_{23}$, МПа
Ель	336	0,33	126
Сосна	567	0,33	214
Береза	1 124	0,29	436
Ясень	1 557	0,40	557
Бук	2 135	0,29	828
Дуб	1 717	0,30	663

Отметим, что, помимо равенства значений модулей и коэффициентов Пуассона, а также физических коэффициентов податливости и жесткости, для конгломерата во всех случаях выполняется классическое условие изотропии [Лехницкий, 1977]:

$$E = \frac{1}{2 \cdot (1 + \nu)} G \quad (18)$$

Ввиду этого конгломерат древесных частиц можем считать изотропным; индексы, указывающие направление бывших осей упругой симметрии, в дальнейшем опустим.

Следует учесть, что оценки упругих постоянных получены для конгломератов с плотностью цельной древесины (поскольку при расчете осредненных значений упругих постоянных использованы значения упругих постоянных цельной древесины).

Сопоставим осредненные технические упругие постоянные конгломерата частиц древесины различных пород с плотностью древесины. Данные о плотности древесины по [9] представлены в табл. 7.

Таблица 7

Плотность древесины при влажности 10–12 % [9]

Порода	Плотность, $г/см^3$
Ель	445
Сосна	505
Береза	640
Ясень	680
Бук	700
Дуб	690

Данные табл. 6 и 7 сопоставлены на графиках, представленных на рис. 2, 3.

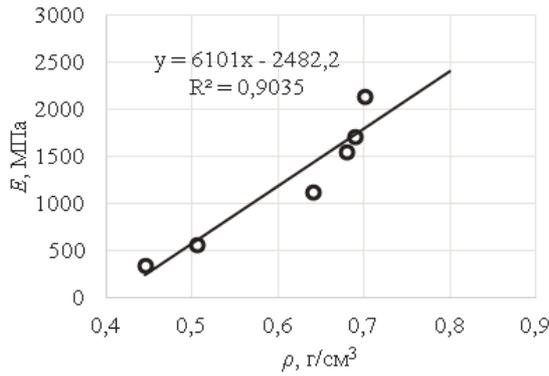


Рис. 2. Зависимость среднего модуля упругости конгломерата древесных частиц от плотности цельной древесины

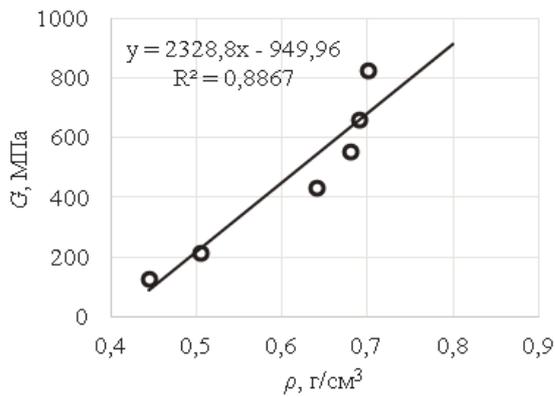


Рис. 3. Зависимость среднего модуля сдвига конгломерата древесных частиц от плотности цельной древесины

Данные, представленные на графиках, с удовлетворительной точностью аппроксимируются линейными функциями:

$$E = 610\rho - 2482,2 \quad (19)$$

$$G = 2328,8\rho - 949,96 \quad (20)$$

Заметим, что линейный характер связи модулей упругости и сдвига для цельной древесины неоднократно отмечался ранее.

Коэффициент Пуассона менее чувствителен к изменению плотности конгломерата (см. табл. 6). Выражение для коэффициента получим, подставив формулы (19), (20) в формулу (18) — результаты расчета представлены графиком на рис. 4.

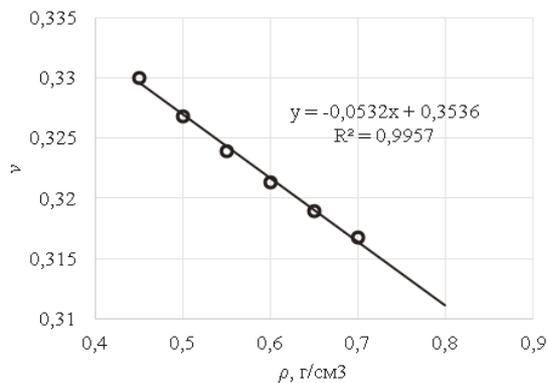


Рис. 4. Коэффициент Пуассона конгломерата древесных частиц в зависимости от плотности

Полагаем, что в дальнейшем целесообразно провести экспериментальные исследования с целью проверки теоретических выкладок, а также интеграцию полученных результатов в методику оценки энергоэффективности продукции лесопереработки, рассмотренную в [10–13].

Литература

1. Grigorev I., Khitrov E., Kalistratov A., Bozhbov V., Ivanov V. New approach for forest production stocktaking based on energy cost // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14 a. 2014. P. 407-414.
2. Grigorev I., Nikiforova A., Khitrov E., Ivanov V., Gasparian G. Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14 b. 2014. P. 443-446.
3. Модин Н.А., Ершкин А.Н. Брикетирование измельченной древесины и древесной коры. М.: Лесная промышленность, 1971. 112 с.
4. Мюллер О.Д. Совершенствование технологии производства древесных гранул: автореф. дис. ... д-ра ... техн. наук. Архангельск, 2015. 31 с.
5. Поздняков А.А. Прочность и упругость композиционных древесных материалов. М.: Лесная промышленность, 1988. 133 с.
6. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1977. 416 с.
7. Коршак А.В., Бирман А.Р., Хитров Е.Г., Коркка А.А., Селимов А.М. К вопросу повышения надежности оборудования лесоперерабатывающего комплекса // Изв. С. Петерб. лесотехн. акад. 2010. № 191. С. 144-151.
8. Коршак А.В., Бирман А.Р., Онегин В.И., Хитров Е.Г. Брикетирование опилок на прессах ударного типа // Изв. С. Петерб. лесотехн. акад. 2011. № 197. С. 175-181.
9. Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. М.: Изд-во МГУЛ, 2001. 333 с.
10. Григорьев И.В., Хитров Е.Г., Власов Ю.Н., Иванов В.А., Жданович В.И. О необходимости дополнительных исследований энергоемкости процесса поперечного пиления древесины // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 4 (20). С. 143-147.
11. 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.
12. Куницкая О.А., Хитров Е.Г., Ильющенко Д.А. Уплотнение древесных материалов под действием ударной нагрузки // Научное обозрение. 2012. № 4. С. 121-127.
13. Куницкая О.А. Обоснование направлений диверсификации обработки низкотоварной древесины на комплексных лесопромышленных предприятиях с использованием инновационных технологий СПб.: СПбГЛТУ, 2015. 250 с.

References

1. Grigorev I., Khitrov E., Kalistratov A., Bozhbov V., Ivanov V. New approach for forest production stocktaking based on energy cost // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14 a. 2014. P. 407-414.

2. Grigorev I., Nikiforova A., Khitrov E., Ivanov V., Gasparian G. Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14 b. 2014. P. 443-446.
3. Modin N.A., Eroshkin A.N. Briquetting of chopped wood and wood bark. M.: Lesnaya promyshlennost', 1971. 112 p.
4. Myuller O.D. Improving pellet production technology: avtoref. dis. ... d-ra ... tekhn. nauk. Arkhangel'sk, 2015. 31 p.
5. Pozdnyakov A.A. The strength and elasticity of composite wood materials. M.: Lesnaya promyshlennost', 1988. 133 p.
6. Lekhnitskii S.G. The theory of an anisotropic elastic body. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Nauka, 1977. 416 p.
7. Korshak A.V., Birman A.R., Khitrov E.G., Korkka A.A., Selimov A.M. To question of equipment reliability increasing in forest complex // Izvestia SPbLTA. 2010. № 191. P. 144-151.
8. Korshak A.V., Birman A.R., Onegin V.I., Khitrov E.G. A sawdust briquettes production under impact press equipment // Izvestia SPbLTA. 2011. № 197. P. 175-181.
9. Ugolev B.N. Wood-with the basics of Commodity Forest. M.: Izd-vo MGUL, 2001. 333 p.
10. Grigor'ev I.V., Khitrov E.G., Vlasov Yu.N., Ivanov V.A., Zhdanovich V.I. The need for further research of energy consumption for timber cross-cutting // Systems. Methods. Technologies. 2013. № 4 (20). P. 143-147.
11. Grigor'ev I.V., Khitrov E.G., Ivanov V.A., Zhdanovich V.I., Derbin M.V. Joint influence of a temperature and humidity of a pine tree wood on energy-output ratio of a cross-cutting process // Systems. Methods. Technologies. 2014. № 2 (22). P. 157-162.
12. Kunitskaya O.A., Khitrov E.G., Il'yushenko D.A. Compaction of timber under impact load // Science Review. 2012. № 4. P. 121-127.
13. Kunitskaya O.A. The Justification of the directions of diversification of processing on semi-subsistence wood complex wood industries using innovative technologies. SPb.: SPbGLTU, 2015. 250 p.

УДК 630.432.31

DOI: 10.18324/2077-5415-2017-1-146-151

Исследование закономерностей разрушения грунта при работе комбинированных грунтометов для тушения лесных пожаров

В.Я. Шапиро^а, И.В. Григорьев^б, О.И. Григорьева^с, В.А. Иванов^д

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский 5, Санкт-Петербург, Россия

^аvl54shap@rambler.ru, ^бsilver73@inbox.ru, ^сgrigoreva_o@list.ru, ^дivanovva55@mail.ru

Статья поступила 12.01.2017, принята 16.02.2017

Лесные, особенно низовые, пожары являются серьезной проблемой для российских лесов. Один из способов их тушения — это засыпка кромки пожара массой разрыхленного грунта, для чего используются специальные машины — грунтометы. Наиболее перспективными следует считать комбинированные конструкции грунтометов, при использовании которых реализуются три основных этапа. На первом этапе верхний, наиболее прочный слой грунта (подстилка) снимается плоскими ножами, расположенными на роторе. На втором этапе основная масса грунта, необходимая для эффективного метания в направлении кромки лесного пожара, разрушается и разрыхляется с помощью сферических ножей определенного радиуса, на третьем этапе специальный рабочий орган грунтомета осуществляет метание разрыхленной массы грунта на заданные расстояние и высоту. Наибольшую сложность с позиций механики деформирования и разрушения твердого тела представляет первый этап, поскольку слой лесной подстилки — это волокнистая по своей структуре среда с включениями элементов древесной (корневой) системы. Этим обстоятельством можно объяснить особое внимание к процессу разрушения подстилки рабочим органом на низких скоростях резания. Одной из основных проблем второго этапа (взаимодействие сферического ножа с массивом грунта) является определение скорости сближения рабочего органа с поверхностью слоя с определенными физико-механическими свойствами. В ряде случаев при фрезеровании вязких и близких к пределу текучести слоев грунта для эффективного функционирования рабочих органов грунтомета используется режим пониженных скоростей. При изучении процессов метания грунта (третий этап) необходимо установить влияние на дальность и высоту метания таких факторов, как размеры разрушенного на предыдущих этапах слоя грунта, кинематические и угловые параметры рабочего органа грунтомета. В статье разработана математическая модель, позволяющая на стадии теоретических исследований и проработки проектно-конструкторских решений оценить результаты эффективной работы комбинированного грунтомета для тушения лесных пожаров с учетом различных факторов и условий реализации технологических процессов.

Ключевые слова: лесные пожары; грунтомет; тушение лесных пожаров грунтом.