

## Движение ультразвука в древесине

В.А. Соколова<sup>a</sup>, С.М. Базаров<sup>b</sup>, С.А. Угрюмов<sup>c</sup>

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

<sup>a</sup> sokolova\_vika@inbox.ru, <sup>b</sup> s.bazarow@yandex.ru, <sup>c</sup> ugr-s@yandex.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1605-5834>

Статья поступила 24.03.2021, принята 7.05.2021

*В статье рассматривается вопрос применения ультразвука в деревообработке, что позволяет значительно повысить качество и производительность технологических процессов, даёт широчайшие возможности для механизации и автоматизации технологических процессов и (очень часто) позволяет снизить как материальные, так и финансовые затраты на производство. Проведено исследование коэффициента поглощения ультразвука. Представлен расчет математической модели движения ультразвука в древесине. Представлено построение уравнений движения с учетом реологии материала древесины, в виде волновых уравнений для ультразвука. Получена оценка коэффициента поглощения для вязко-упругого материала. Для решения задачи была использована реологическая модель для природного полимера с учетом сил инерции. Разработана математическая модель движения ультразвука в древесине, учитывающая реологические характеристики древесины и позволяющая прогнозировать изменение анатомических и химических свойств древесины в процессе ультразвуковой обработки. Данная математическая модель необходима для разработки технологических рекомендаций по осуществлению процессов подготовки древесины и ведения процесса отделки древесины лакокрасочными материалами с целью формирования покрытий с улучшенными эксплуатационными свойствами, заключающимися в предварительной обработке древесины ультразвуком до нанесения лакокрасочного покрытия.*

**Ключевые слова:** ультразвук, древесина, уравнение движения, смещение, деформация, поглощение.

## Ultrasound movement in wood

V.A. Sokolova<sup>a</sup>, S.M. Bazarov<sup>b</sup>, S.A. Ugryumov<sup>c</sup>

St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia

<sup>a</sup> sokolova\_vika@inbox.ru, <sup>b</sup> s.bazarow@yandex.ru, <sup>c</sup> ugr-s@yandex.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1605-5834>

Received 24.03.2021, accepted 7.05.2021

*The article deals with the use of ultrasound in woodworking, which can significantly improve the quality and productivity of technological processes, provide the widest opportunities for mechanization and automation of technological processes and reduce both material and financial costs of production. The study of the ultrasound absorption coefficient is carried out. The calculation of a mathematical model of the motion of ultrasound in wood is presented. The construction of the equations of motion taking into account the rheology of the wood material, in the form of wave equations for ultrasound, is presented. An estimate of the absorption coefficient for a viscoelastic material is obtained. To solve the problem, a rheological model for a natural polymer is used, taking into account the forces of inertia. A mathematical model of the motion of ultrasound in wood is developed, which takes into account the rheological characteristics of wood and allows predicting changes in the anatomical and chemical properties of wood during ultrasonic processing. This mathematical model is necessary for the development of technological recommendations for the implementation of wood preparation processes and the process of finishing wood with paint and varnish materials in order to form coatings with improved performance properties, which consist in the preliminary treatment of wood with ultrasound before applying the paint and varnish coating.*

**Keywords:** ultrasound, wood, equation of motion, displacement.

**Введение.** В настоящее время ультразвуковые технологии являются одними из самых экологически чистых, высокопроизводительных и высококачественных технологических процессов. При воздействии ультразвуковых колебаний в среде возникают переменные смещения [1, 2].

Использование ультразвука имеет ряд преимуществ: повышает твердость и плотность поверхности, придает эффект полирования поверхности, выравнива-

ет механические свойства поверхности, повышает качество технологических процессов, снижает материальные затраты на производство [13, 14].

В деревообработке применение ультразвука развивается по трем направлениям:

1. ультразвуковая сушка древесины;
2. ультразвуковая резка пиломатериалов;
3. модификации древесины.

В лаборатории СПбГЛТУ проводятся исследования по изучению движения ультразвука в древесине. Аналитическое исследование представления коэффициента поглощения ультразвука в материале древесины представляет непосредственный научно-технический интерес [15, 16].

**Методика исследования.** Решение задачи выполняется в два этапа: построение уравнений движения с учетом реологии материала древесины и представления их в виде волновых уравнений для ультразвука [7, 8].

Интенсивность ультразвука уменьшается с увеличением расстояния от источника излучения в соответствии с формулой:

$$I = I_0 \exp(-2\alpha x), \quad (1)$$

где  $I_0$  - интенсивность источника ультразвука,  $\alpha$  - амплитудный коэффициент поглощения,  $x$  - координата расстояния.

Древесина является природным полимером, для которого характерны деформации: упругие, высокоэластичные и вязкотекучие. Этим деформациям соответствуют физические состояния: стеклообразное (твердое), высокоэластичное (твердое) и вязкотекучее (жидкое). В термо-акустических полях по мере повышения их интенсивности материал древесины переходит из твердого состояния в текучее. В высокоградиентных термо-акустических полях, воздействующих на материал древесины, он может находиться одновременно в упруго-вязко-пластическом состоянии. В древесиноведении исследованы деформационные свойства материала древесины и определена его реологическая модель в виде суперпозиции тел Гука и Кельвина.

**Исследование.** Реологическая модель вязко-упруго-пластического однородного материала (нормальные напряжения  $\sigma$  - деформация  $\epsilon$ ) имеет вид [3]:

$$\sigma + t_r \frac{d\sigma}{dt} = E\epsilon + \mu^* \frac{d\epsilon}{dt} + K^*, \quad (2)$$

сдвиговые напряжения  $\tau$  - угловая деформация  $\gamma$  [4, 5],

$$\tau + t_r \frac{d\tau}{dt} = G\gamma + \mu \frac{d\gamma}{dt} + K, \quad (3)$$

Уравнения движения в сплошной среде связывают пространственные градиенты напряжения с массовыми силами и силами инерции и составляются исходя из условия того, что масса, умноженная на ускорение, равна сумме всех сил, действующих на массу; в общем виде оно имеет вид:

$$rDL/Dt = M + P, \quad (4)$$

где  $M$  - массовая сила в единице объема,  $P$  - поверхностная сила, действующая на единицу массы, скорость движения в векторном виде:

$$L = iu + jv + kw, \quad (5)$$

оператор дифференцирования:

$$D/Dt = \partial/\partial t + d/dt = \partial/\partial t + u\partial/\partial x + v\partial/\partial y + w\partial/\partial z, \quad (6)$$

где  $u, v, w$  - скорости движения вдоль прямоугольных координат  $x, y, z$ ,  $\partial/\partial t$  - оператор нестационарности,  $d/dt$  - оператор конвективности.

Проекция массовой и поверхностной сил на координатные оси:

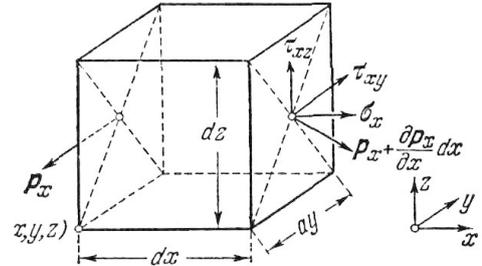
$$M = iX + jY + kZ, \quad (7)$$

$$P = iP_x + jP_y + kP_z. \quad (8)$$

Поверхностной силе, отнесенной к единице объема, соответствует уравнение (рисунок 1):

$$P = \partial p_x / \partial x + \partial p_y / \partial y + \partial p_z / \partial z, \quad (9)$$

где  $\sigma, \tau$  - нормальные напряжения и касательные напряжения.



**Рис. 1.** К выводу тензора напряжений при неоднородном напряженном состоянии.

Напряжения, действующие на элементарные площадки равны:

$$p_x = i\sigma_x + j\tau_{xy} + k\tau_{xz}, \quad (10)$$

$$p_y = i\tau_{yx} + j\sigma_y + k\tau_{yz}, \quad (11)$$

$$p_z = i\tau_{zx} + j\tau_{zy} + k\sigma_z, \quad (12)$$

где  $\sigma, \tau$  - соответственно нормальные и касательные напряжения.

Поверхностная сила имеет векторное представление:

$$P = i(\partial\sigma_x/\partial x + \partial\tau_{xy}/\partial y + \partial\tau_{xz}/\partial z) + j(\partial\tau_{yx}/\partial x + \partial\sigma_y/\partial y + \partial\tau_{yz}/\partial z) + k(\partial\tau_{zx}/\partial x + \partial\tau_{zy}/\partial y + \partial\sigma_z/\partial z) \quad (13)$$

Уравнения движения деформируемого материала при пренебрежении массовыми силами примут вид:

$$\left. \begin{aligned} \rho Du/Dt &= (\partial\sigma_x/\partial x + \partial\tau_{xy}/\partial y + \partial\tau_{xz}/\partial z) \\ \rho Dv/Dt &= (\partial\tau_{yx}/\partial x + \partial\sigma_y/\partial y + \partial\tau_{yz}/\partial z) \\ \rho Dw/Dt &= (\partial\tau_{zx}/\partial x + \partial\tau_{zy}/\partial y + \partial\sigma_z/\partial z) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

При рассмотрении колебательного движения конвективной составляющей ускорения можно пренебречь и система уравнений (14) переходит в:

$$\left. \begin{aligned} \rho \partial u / \partial t &= (\partial\sigma_x/\partial x + \partial\tau_{xy}/\partial y + \partial\tau_{xz}/\partial z) \\ \rho \partial v / \partial t &= (\partial\tau_{yx}/\partial x + \partial\sigma_y/\partial y + \partial\tau_{yz}/\partial z) \\ \rho \partial w / \partial t &= (\partial\tau_{zx}/\partial x + \partial\tau_{zy}/\partial y + \partial\sigma_z/\partial z) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Относительное объемное изменение материала равно:

$$d(\delta V)/\delta V = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z. \quad (16)$$

В акустике, как одном из разделов механики сплошных сред, вводится понятие «частицы» среды элементарного объема  $\delta V$ . Элементарному объему среды ставится в соответствие радиус-вектор  $r$ , его деформируемому смещению соответствует вектор  $s$ . Координатное представление вектора смещения имеет вид:

$$s = is_x + js_y + ks_z, \quad (17)$$

Скорость вектора смещения равна:

$$ds/dt = d(is_x + js_y + ks_z)/dt. \quad (18)$$

При движении материала древесины скоростям смещения соответствуют покомпонентные скорости движения:

$$ds/dt = iu + jv + kw, \quad (19)$$

где  $u = ds_x/dt$ ,  $v = ds_y/dt$ ,  $w = ds_z/dt$ , и соответственно:

$$s_x = \int u dt, s_y = \int v dt, s_z = \int w dt. \quad (20)$$

При переходе в левых частях равенств (15) от скорости к смещению получаем систему уравнений, связывающих смещение с напряжением:

$$\left. \begin{aligned} \rho \partial^2 s_x / \partial t^2 &= (\partial \sigma_x / \partial x + \partial \tau_{xy} / \partial y + \partial \tau_{xz} / \partial z) \\ \rho \partial^2 s_y / \partial t^2 &= (\partial \tau_{xy} / \partial x + \partial \sigma_y / \partial y + \partial \tau_{yz} / \partial z) \\ \rho \partial^2 s_z / \partial t^2 &= (\partial \tau_{xz} / \partial x + \partial \tau_{yz} / \partial y + \partial \sigma_z / \partial z) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Запишем связь деформации с пространственными градиентами вектора смещения:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \partial s_x / \partial x \\ \varepsilon_y &= \partial s_y / \partial y \\ \varepsilon_w &= \partial s_z / \partial z \\ \gamma_{xy} &= \partial s_x / \partial y + \partial s_y / \partial x \\ \gamma_{yz} &= \partial s_y / \partial z + \partial s_z / \partial y \\ \gamma_{zx} &= \partial s_z / \partial x + \partial s_x / \partial z \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

и соответственно для скорости деформации:

$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon_x / dt &= d(\partial s_x / \partial x) / dt \\ d\varepsilon_y / dt &= d(\partial s_y / \partial y) / dt \\ d\varepsilon_w / dt &= d(\partial s_z / \partial z) / dt \\ d\gamma_{xy} / dt &= d(\partial s_x / \partial y + \partial s_y / \partial x) / dt \\ d\gamma_{yz} / dt &= d(\partial s_y / \partial z + \partial s_z / \partial y) / dt \\ d\gamma_{zx} / dt &= d(\partial s_z / \partial x + \partial s_x / \partial z) / dt \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

или

$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon_x / dt &= \partial u / \partial x \\ d\varepsilon_y / dt &= \partial v / \partial y \\ d\varepsilon_w / dt &= \partial w / \partial z \\ d\gamma_{xy} / dt &= \partial u / \partial y + \partial v / \partial x \\ d\gamma_{yz} / dt &= \partial v / \partial z + \partial w / \partial y \\ d\gamma_{zx} / dt &= \partial w / \partial x + \partial u / \partial z \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Замыкание построенных уравнений смещения должно производиться путем рассмотрения связи тензора напряжений с тензором деформаций соответствующих реологий. В соответствии с реологическими моделями можно записать:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= E\varepsilon_x + \mu * d\varepsilon_x / dt + K * \\ \sigma_y &= E\varepsilon_y + \mu * d\varepsilon_y / dt + K * \\ \sigma_z &= E\varepsilon_z + \mu * d\varepsilon_z / dt + K * \\ \tau_{xy} &= G\gamma_{xy} + \mu d\gamma_{xy} / dt + K \\ \tau_{yz} &= G\gamma_{yz} + \mu d\gamma_{yz} / dt + K \\ \tau_{zx} &= G\gamma_{zx} + \mu d\gamma_{zx} / dt + K \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

В технических приложениях воздействия ультразвука на материал принимается плоская структура вол-

новых колебаний [3,4]. Это означает, что смещение, деформация, напряжение и другие параметры, характеризующие состояние материала древесины, зависят от одной пространственной координаты, совпадающей с направлением распространения волны и времени [5, 6]. Смещению частиц среды в бегущей плоской волне соответствует представление:

$$S = A \exp[i(\omega \pm kx)], \quad (26)$$

где  $A$  – амплитуда колебания,  $\omega$  – частота,  $k$  – волновое число.

Общее решение волнового уравнения имеет вид:

$$S = A \exp[i(\omega t - kx)] + B \exp[i(\omega t + kx)], \quad (27)$$

здесь  $\omega$  – частота,  $k = \omega / c = \omega (\rho / E)^{1/2}$  – волновое число.

Плоской волне в вязком материале соответствует уравнение для напряжения:

$$\sigma = \mu * d\varepsilon / dt = \mu * \partial^2 s / \partial x \partial t, \quad (28)$$

тогда волновое уравнение принимает вид:

$$\rho \partial^2 s / \partial t^2 = \mu * \partial^3 s / \partial x^2 \partial t, \quad (29)$$

или

$$\rho \partial^2 s / \partial t^2 = i\omega \mu * \partial^2 s / \partial x^2, \quad (30)$$

или

$$\rho \partial^2 s / \partial t^2 = E_0 \partial^2 s / \partial x^2, \quad (31)$$

Для вязко-упругого материала напряжение в рассматриваемых условиях равно [17, 18]:

$$\sigma = E \varepsilon + \mu * d\varepsilon / dt, \quad (32)$$

и волновое уравнение принимает вид:

$$\rho \partial^2 s / \partial t^2 = E \partial^2 s / \partial x^2 + \mu * \partial^3 s / \partial x^2 \partial t, \quad (33)$$

или

$$\rho \partial^2 s / \partial t^2 = (E + i\omega \mu *) \partial^2 s / \partial x^2, \quad (34)$$

или

$$\rho \partial^2 s / \partial t^2 = E * \partial^2 s / \partial x^2, \quad (35)$$

здесь введен комплексный модуль упругости  $E * = E + i\omega \mu *$ .

После соответствующих вычислений получаем оценку коэффициента поглощения для вязко-упругого материала [9, 10]:

$$\alpha = 2^{-1/2} \omega [\omega \mu * \rho / (E^2 + \omega^2 \mu *^2)]^{1/2}, \quad (36)$$

которая при  $E=0$  переходит в коэффициент поглощения для вязкой среды [11, 12].

Для определения коэффициента поглощения волновых колебаний в древесине воспользуемся реологической моделью [10]:

$$\sigma = E\varepsilon + \mu * d\varepsilon / dt + K * - t_r * (E d\varepsilon / dt + \mu * d^2\varepsilon / dt^2), \quad (37)$$

или

$$\sigma = E\varepsilon + \mu * d\varepsilon / dt - t_r * \mu * d^2\varepsilon / dt^2, \quad (38)$$

где  $\mu * = \mu - t_r * E$ .

Представляя деформацию смещением, получаем уравнение:

$$\sigma = E \partial s / \partial x + \mu * \partial^2 s / \partial x \partial t - t_r * \mu * \partial^3 s / \partial x \partial t^2 \quad (39)$$

Для волновых колебаний (27) принимает вид:

$$\rho \partial^2 s / \partial t^2 = E \partial^2 s / \partial x^2 + i\omega \mu * \partial^2 s / \partial x^2 + t_r * \mu * \omega^2 \partial^2 s / \partial x^2 \quad (40)$$

или

$$\rho \partial^2 s / \partial t^2 = [ (E + t_{r*} \mu_* \omega^2) + i \omega \mu ] \partial^2 s / \partial x^2 \quad (41)$$

Сравнивая уравнения (34) и (37) [19, 20], видно, что здесь коэффициент поглощения можно получить путем замены  $E \rightarrow E + t_{r*} \mu_* \omega^2$ .

#### Литература

1. Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товаро-ведения. М.: Лесная пром-сть, 1986. 368 с.
2. Базаров С.М., Семенова Н.И. Движение материала древесины в вязкотекучем состоянии. СПб.: СПбЛТА, 2007. 68 с.
3. Ишлинский А.Ю. Механика вязкопластических и не вполне упругих тел. М.: Наука, 1986. 360 с.
4. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов. М.: Строитель, 1971. 367 с.
5. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высш. школа, 1978. 447 с.
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 742 с.
7. Седов Л.И. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1970. Т. 1. 492 с.
8. Лодж А.С. Эластичные жидкости. М.: Наука, 1969. 464 с.
9. Михайлов И.Г., Соловьев В.А., Сырников Ю.П. Основы молекулярной акустики. М.: Наука, 1964. 514 с.
10. Базаров С.М., Говядин И.К., Елкин А.В. Вязко-упруго-пластическое движение материала древесины // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2020. № 230. С. 164-172.
11. Bazarov S., Belenkiy Y., Sokolova V., Solovyev A. Two-criteria technical and economic optimization of forest transportation problem // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IV scientific-technical conference «Forests of Russia: policy, industry, science and education». 2019. P. 012064.
12. Соколова В.А., Кривоногова А.С., Иванов А.М., Марков В.А., Парфенопуло Г.К. Пути улучшения качества продукции на деревообрабатывающем предприятии // Сб. ст. по материалам науч.-технической конф. ин-та технологических машин и транспорта леса по итогам науч.-исслед. работ 2018 г. (30 янв. 2019 г.) / отв. ред. В.А. Соколова. СПб., 2019. С. 50-55.
13. Кривоногова А.С., Бирман А.Р., Соколова В.А., Беспалова В.В. Анализ движения жидкости в капиллярно-пористых структурах в контексте улучшения механических показателей конструкционных материалов // Леса России: политика, пром-сть, наука, образование: материалы IV науч.-технической конф. (22-25 мая 2019 г.). СПб., 2019. С. 361-363.
14. Соколова В.А., Кузнецова К.М., Парфенопуло Г.К., Третьякова Е.Ю., Газакбаев М. Новые способы получения конкурентоспособных строительных изделий из низкосортной древесины // Сб. ст. по материалам науч.-технической конф. ин-та технологических машин и транспорта леса по итогам науч.-исслед. работ 2018 г. (30 янв. 2019 г.) / отв. ред. В.А. Соколова. СПб., 2019. С. 295-301.
15. Куницкая О.А., Базаров С.М., Григорьев И.В., Бурмистрова С.С., Есин Г.Ю. Новые конструкции и математические модели расчета установок для пропитки древесины в пьезопериодическом поле // Научное обозрение. 2012. № 4. С. 128-135.
16. Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н. Ультразвуковая размерная обработка материалов: моногр. Барнаул: Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 1999. 119 с.

**Заключение.** Разработанная математическая модель движения ультразвука в древесине учитывает реологические характеристики древесины и позволяет прогнозировать изменение анатомических и химических свойств древесины в процессе ультразвуковой обработки.

17. Blokh A.G., Bazarov S.M., Nakhman Y.V. Some general laws governing droplet size distribution on atomisation of a liquid. Thermal Engineering. 1967. V. 14. № 7. P. 45.
18. Воякин А. Технологии ультразвукового шлифования древесины // Лесная индустрия. 2014. № 11 (79). С. 30-33.
19. Гаспарян Г.Д. Методологические и технологические основы процесса окорки лесоматериалов ультразвуком: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01 / Моск. гос. ун-т леса. Братск, 2013. 388 с.
20. Sergeevichev A., Kushnerev V., Sergeevichev V., Sokolova V., Onegin V. Analysis of the influence of instrumental and regime factors on the quality of wood grinding // Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference «Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering - APITECH-2019». Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations; Polytechnical Institute of Siberian Federal University. 2019. P. 44043.

#### References

1. Ugolev B.N. Wood science with the basics of forest commodity science. M.: Lesnaya prom-st', 1986. 368 p.
2. Bazarov S.M., Semenova N.I. Movement of wood material in viscous-flowing condition. SPb.: SPbLTA, 2007. 68 p.
3. Ishlinskij A.YU. The mechanics of viscoplastic and not completely elastic bodies. M.: Nauka, 1986. 360 p.
4. Gol'dshtejn M.N. Mechanical properties of soils. M.: Stroitel', 1971. 367 p.
5. Vyalov S.S. Rheological foundations of soil mechanics. M.: Vyssh. shkola, 1978. 447 p.
6. SHlihting G. Boundary layer theory. M.: Nauka, 1969. 742 p.
7. Sedov L.I. Mechanics of a continuous environment. M.: Nauka, 1970. V. 1. 492 p.
8. Lodzh A.S. Elastic fluids. M.: Nauka, 1969. 464 p.
9. Mihajlov I.G., Solov'ev V.A., Syrnikov YU.P. Fundamentals of molecular acoustics. M.: Nauka, 1964. 514 p.
10. Bazarov S.M., Govyadin I.K., Elkin A.V. Viscous-elastic-plastic movement of wood material // Izvestia SPbLTA. 2020. № 230. P. 164-172.
11. Bazarov S., Belenkiy Y., Sokolova V., Solovyev A. Two-criteria technical and economic optimization of forest transportation problem // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IV scientific-technical conference «Forests of Russia: policy, industry, science and education». 2019. P. 012064.
12. Sokolova V.A., Krivonogova A.S., Ivanov A.M., Markov V.A., Parfenopulo G.K. Ways to improve the quality of products at the woodworking enterprise // Sb. st. po materialam nauch.-tekhnicheskoy konf. in-ta tekhnologicheskikh mashin i transporta lesa po itogam nauch.-issled. rabot 2018 g. (30 yanv. 2019 g.) / otv. red. V.A. Sokolova. SPb., 2019. P. 50-55.
13. Krivonogova A.S., Birman A.R., Sokolova V.A., Bepalova V.V. Analysis of fluid movement in capillary-porous structures in the context of improvement of mechanical parameters of structural materials // Lesa Rossii: politika, prom-st', nauka, obrazovanie: materialy IV nauch.-tekhnicheskoy konf. (22-25 maya 2019 g.). SPb., 2019. P. 361-363.

14. Sokolova V.A., Kuznecova K.M., Parfenopulo G.K., Tret'yakova E.YU., Gazakbaev M. New methods of producing competitive construction products from low-grade wood // Sb. st. po materialam nauch.-tekhnicheskoy konf. in-ta tekhnologicheskikh mashin i transporta lesa po itogam nauch.-issled. rabot 2018 g. (30 yanv. 2019 g.) / otv. red. V.A. Sokolova. SPb., 2019. P. 295-301.
15. Kunickaya O.A., Bazarov S.M., Grigor'ev I.V., Burmistrova S.S., Esin G.YU. New designs and mathematical models of calculation of installations for impregnation of wood in the piezoperiodic field // Science Review. 2012. № 4. P. 128-135.
16. Hmelev V.N., Barsukov R.V., Cyganok S.N. Ultrasonic dimensional processing of materials: monogr. Barnaul: Izd-vo AltGTU im. I.I. Polzunova, 1999. 119 p.
17. Blokh A.G., Bazarov S.M., Nakhman Y.V. Some general laws governing droplet size distribution on atomisation of a liquid. Thermal Engineering. 1967. V. 14. № 7. P. 45.
18. Voyakin A. Technologies of ultrasonic grinding of wood // Lesnaya industriya. 2014. № 11 (79). P. 30-33.
19. Gasparyan G.D. Methodological and technological foundations of the process of cutting timber by ultrasound: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.21.01 / Mosk. gos. un-t lesa. Bratsk, 2013. 388 p.
20. Sergeevichev A., Kushnerev V., Sergeevichev V., Sokolova V., Onegin V. Analysis of the influence of instrumental and regime factors on the quality of wood grinding // Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference «Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering - APITECH-2019». Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations; Polytechnical Institute of Siberian Federal University. 2019. P. 44043.