

УДК 536.2:539.3:539.4

## КОРРЕЛЯЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*Pinus sylvestris* L)

© 2021 г. Ю. И. Головин<sup>1,2,\*</sup>, Д. Ю. Головин<sup>1</sup>, А. А. Самодуров<sup>1</sup>, А. И. Тюрин<sup>1</sup>, Д. А. Кабанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
“Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина”, Научно-исследовательский институт  
“Нанотехнологии и наноматериалы”, Тамбов, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, химический факультет, Москва, Россия

\*E-mail: yugolovin@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.01.2021 г.

После доработки 25.02.2021 г.

Принята к публикации 29.03.2021 г.

Выявлены корреляции между механическими и теплофизическими характеристиками анизотропии древесины сосны обыкновенной с различным содержанием влаги, что дает возможность проводить экспресс-оценку механических свойств, требующих в норме трудоемких и материалоемких разрушающих испытаний, методами неразрушающего определения теплофизических характеристик с помощью бесконтактной динамической термографии.

DOI: 10.31857/S0367676521070097

Древесина и композиты на ее основе — широко используемые природные материалы, характеризующиеся достаточно высокой удельной прочностью, низкой теплопроводностью, экологичностью и выраженной анизотропией большинства физических свойств (особенно у хвойных пород) [1–3]. В связи с последней особенностью хвойную древесину можно рассматривать в качестве репрезентативного представителя более широкого класса волокнистых композитных материалов как природного, так и искусственного происхождения [4–7]. К недостаткам древесины как конструкционного материала можно отнести большую вариативность механических свойств и их сильную зависимость от влажности [8] и различных дефектов строения [9]. Отсюда вытекает необходимость контроля механических свойств деловой древесины и сортировки ее по сортности с целью рационального последующего использования. Определение механических характеристик осуществляют, как правило, трудоемкими и материалоемкими методами разрушающих испытаний. Поэтому весьма актуальной является задача замены разрушающих испытаний неразрушающими (как минимум, с целью снижения объема первых за счет увеличения доли вторых). Широко используемые в физике и материаловедении методы диагностики и характеристики трудно применимы к древесине по ряду причин. В основе

новых методов технической диагностики древесины могут лежать новые физические идеи, в частности, использование малоизученных пока связей между механическими и другими физическими характеристиками композитных материалов. Имеются следующие предпосылки и физические основания к их существованию. Вследствие схожей чувствительности к микроструктуре различные механические свойства материалов могут быть связаны простыми соотношениями. Так, в пластичных металлах твердость  $H$  зависит от предела текучести  $\sigma_y$  как  $H \approx 3\sigma_y$ ; а в твердых и сверхтвердых — от модуля сдвига  $G$  как  $H \approx 0.15G$  [3]. Известны связи между различными транспортными свойствами, а также между ними и механическими характеристиками [10]. Учитывая существование подобных зависимостей, можно предположить, что подобные связи или корреляции можно обнаружить также между механическими и теплофизическими характеристиками (ТФХ) различных материалов, в частности, анизотропных композиционных. При выявлении подобных корреляций их можно будет использовать в более широком круге материалов, в частности, для контроля синтетических полимерных композитов, армированных волокнами (в том числе, и растительными). Первые результаты такого рода представлены в [11]. Располагая подобными зависимостями, можно заменить трудоемкие и матери-

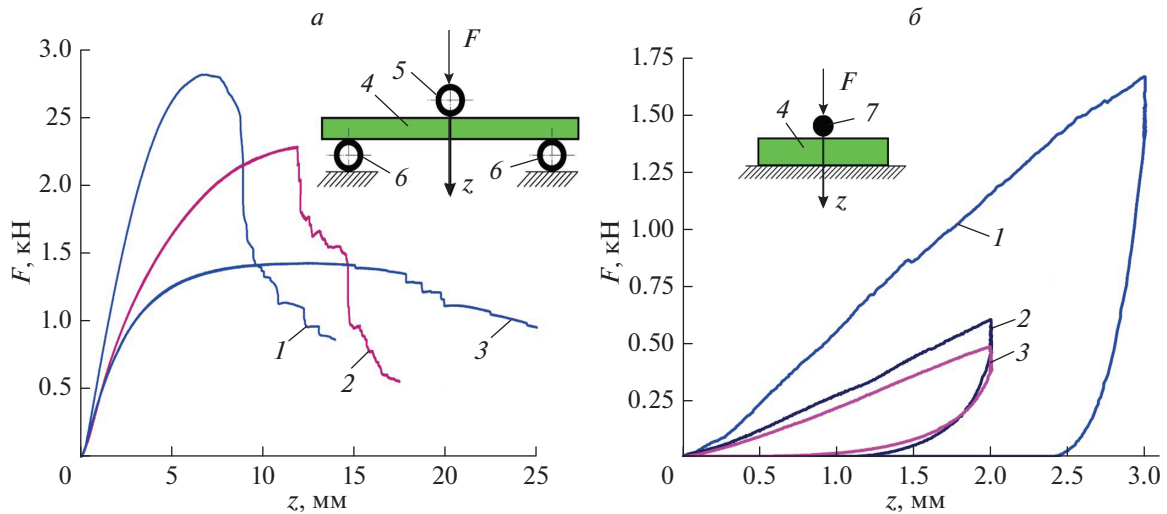


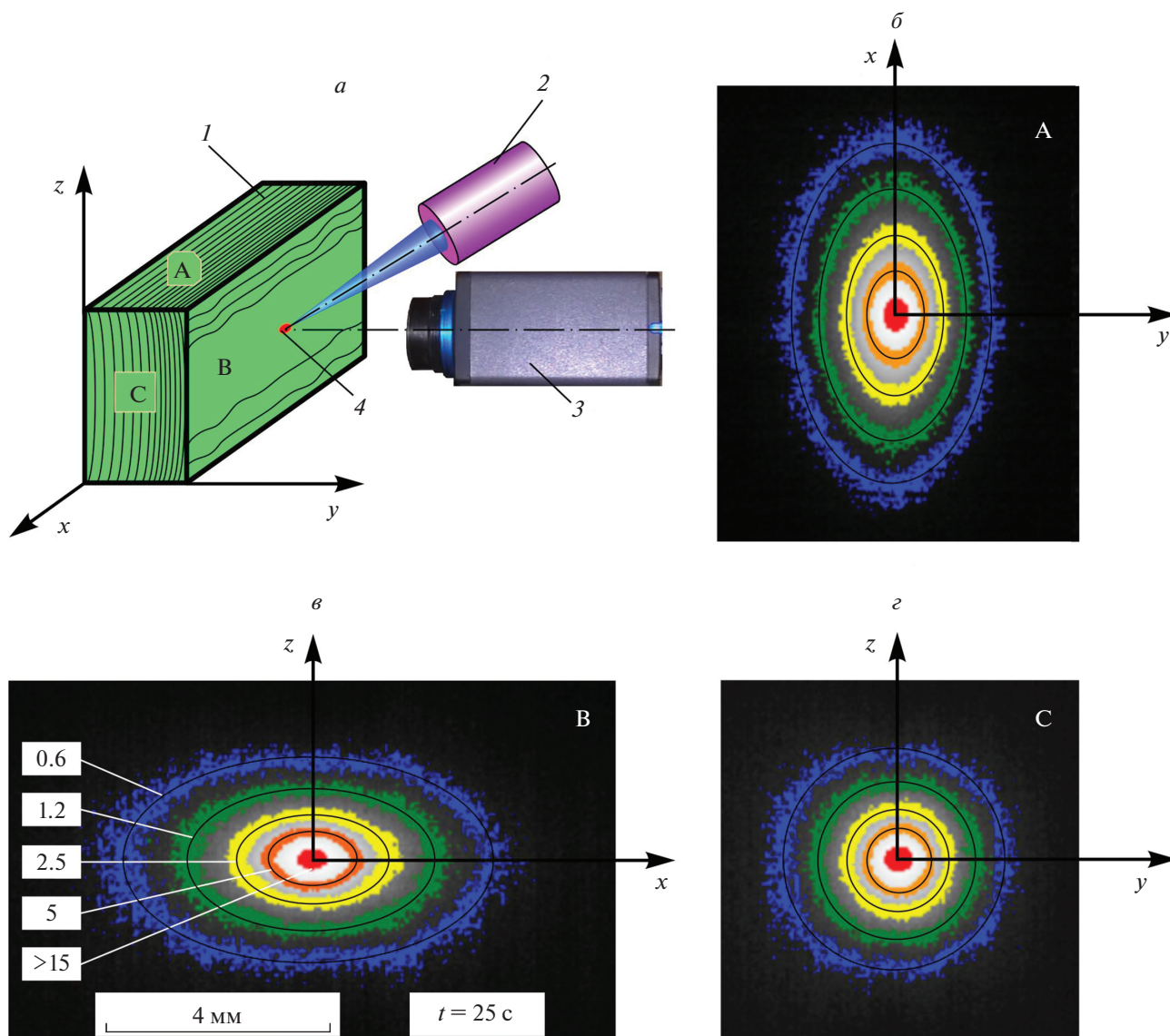
Рис. 1. Диаграммы нагружения древесины сосны при испытаниях трехточечным изгибом (а) и индентировании керамическим шариком диаметром 12,7 мм (б) при различной влажности  $w$ : 1 – 10, 2 – 25,5, 3 – 65,5%, 4 – образец, 5 – верхняя опора, 6 – нижние опоры, 7 – индентор (шарик).

алоемкие разрушающие механические испытания (например, в целях экспресс-оценки механических свойств, сортировки, разбраковки материалов и готовых изделий) на определение их ТФХ неразрушающими бесконтактными экспресс-методами, например, описанными в [12, 13]. Последние в среднем требуют ~1 мин на одно измерение и не нуждаются в вырезке из массива образцов определенной формы и размеров. Целью работы было установление корреляций между несколькими механическими характеристиками (прочностью на изгиб  $\sigma_b$  и скол  $F_c$ , модулем Юнга  $E$ , твердостью  $H$ ) древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L) с одной стороны и компонентами тензора коэффициента температуропроводности  $a_{ij}$  – с другой.

В качестве образцов служили бруски сосновой древесины (ксилемы), не имеющие видимых макроскопических пороков и дефектов структуры по ГОСТ 2140-81 (сучков, трещин, биологических повреждений и др.), различной влажности  $w$  (в диапазоне от 10 до 60%). Прочность определяли методами трехточечного изгиба на образцах размерами  $20 \times 30 \times 350$  мм<sup>3</sup> и раскалывания образцов размерами  $20 \times 30 \times 100$  вдоль волокон, перпендикулярных стороне  $20 \times 30$  мм<sup>2</sup>. Твердость по Бринеллю НВ измеряли методом непрерывного вдавливания керамического шарика диаметром 12,7 мм с одновременной записью диаграммы нагружения. Все механические испытания проводили на испытательной машине MTS 870 Landmark (USA). В каждом виде теста было испытано по 10 образцов. Диаграммы нагружения нескольких типичных образцов, протестированных трех-

точечным изгибом и непрерывным индентированием, представлены на рис. 1.

Измерение компонент тензора температуропроводности  $a_{ij} = \lambda_{ij}/\rho C_p$ , (здесь  $\lambda_{ij}$  – компоненты тензора теплопроводности,  $\rho$  – плотность материала,  $C_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении) было проведено запатентованными нами неразрушающими термографическими методами [14, 15], подробно описанными в [12, 13, 16]. Определение главных компонент тензора  $a_{ij}$  осуществляли путем анализа динамических термограмм на поперечном и двух продольных – латеральном и радиальном срезах (рис. 2а) образцов различной влажности. “Точечный” нагрев избранной грани образца осуществляли сфокусированным пучком твердотельного лазера с диодной накачкой LSR445CP-FC-10W (гауссов радиус пучка на нагреваемой поверхности составлял  $r_0 = 0.1-0.3$  мм). Прямоугольный импульс излучения имел длительность 20–60 с, а регулируемая мощность составляла 1–10 Вт. Динамическое температурное поле на поверхности образца в области радиусом  $(10-20)r_0$ , в которой происходило распространение тепла от пятна нагрева (размеры образцов во всех трех измерениях намного превосходили радиус этой области и не влияли на результаты измерений), кинофильмировали с частотой 10–20 кадров в секунду с помощью тепловизора FLIR-A35sc. Затем каждый кадр динамической термограммы (примеры обработанных термограмм на трех протестированных поверхностях по данным отдельных выбранных кадров показаны на рис. 2б–2г) подвергали компьютерной обработке по разработанным оригинальным моделям и алгоритмам [13]. Их особенностью является учет всего



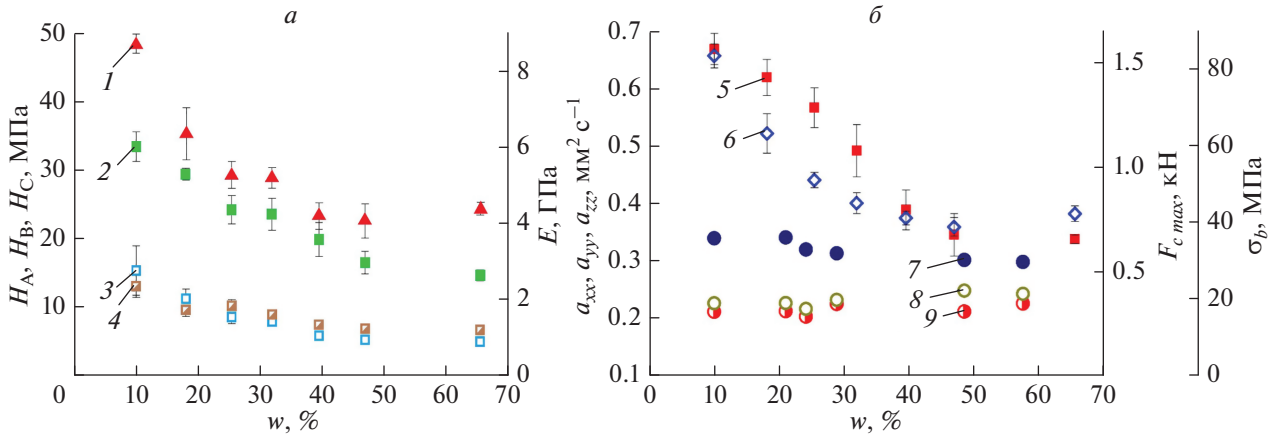
**Рис. 2.** Схема измерения тензора температуропроводности методом динамической термографии (а) и картины характерных изотерм на гранях А, В и С (б–г). Цифры на рисунке (б) обозначают величину локального перегрева в градусах Цельсия.

объема информации, содержащегося в каждом пикселе отснятого фильма. Математическая модель и алгоритм извлечения данных о компонентах тензора  $a_{ij}$  из термограмм принципиально не отличались от описанных в [12, 13], разработанных для изотропных тел. Анизотропию материала учитывали в ортотропном приближении путем замены скалярных коэффициентов теплопереноса на диагональные компоненты тензора 2-го ранга.

Обработку данных, полученных методом бесконтактной динамической термографии, проводили с учетом следующих соображений. Для ортотропного материала уравнение теплопроводности в декартовых координатах, связанных с главными

осями тензора теплопроводности  $\lambda_{ij}$ , записывается в виде  $\lambda_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q_v = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$ , где  $q_v$  – объемная плотность тепловыделения.

Переходя в систему координат, в которой оси  $x, y, z$ , перемасштабированы в отношении  $(\lambda_{xx}/\lambda_{zz})^{1/2} : (\lambda_{yy}/\lambda_{zz})^{1/2} : 1$  и обозначены  $x^*, y^*, z^*$ , получаем уравнение теплопроводности в виде  $\lambda_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial x^{*2}} + \lambda_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial y^{*2}} + \lambda_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^{*2}} + q_v^* = \rho^* C_p \frac{\partial T}{\partial t}$ , аналогичном таковому для изотропного материала с учетом перемасштабирования плотности источ-



**Рис. 3.** Влияние влажности  $w$  на механические и теплопроводящие характеристики древесины. 1 – Модуль Юнга  $E$  при изгибе, 2 – твердость  $H_C$ , на грани С, 3 – твердость  $H_A$  на грани А, 4 – твердость  $H_B$  на грани В (а). 5 – Предел прочности  $\sigma_b$  при трехточечном изгибе, 6 – максимальная сила  $F_{c\ max}$  при расколе древесины и компоненты тензора КТП: 7 –  $a_{zz}$ , 8 –  $a_{xx}$ , 9 –  $a_{yy}$  (б).

ников тепла  $q_v^*$  и плотности материала  $\rho^*$ . Отсюда следует, что извлечение компонент температуропроводности анизотропного материала из экспериментальных данных можно проводить на основе принципов и моделей, разработанных для обработки данных, получаемых на изотропном материале [6], с учетом такого перемасштабирования.

Разработанный алгоритм обработки первичных экспериментальных данных, содержащихся в полученном фильме, записанном тепловизором, состоял из следующих процедур:

- 1) преобразование нативного формата хранения данных тепловизора в покадровый набор двумерных массивов температур;
- 2) установление точного момента времени начала подвода тепла;
- 3) попиксельное усреднение всех кадров до этого момента и получения базового усредненного кадра;
- 4) попиксельное вычитание этого базового кадра из последующих кадров для компенсации локальных неоднородностей оптических свойств поверхности образца;
- 5) установление координат центра пятна нагрева;
- 6) вычитание из температуры каждого пикселя температуры “на бесконечности” для уменьшения влияния дрейфов камеры и однородной засветки поверхности;
- 7) определение пространственного распределения температуры в каждом кадре. Из уравнения теплопроводности следует, что в приближении точечного нагрева изотермы на поверхности представляют собой эллипсы с центрами, совпа-

дающими с центром нагрева. Для построения координатных зависимостей  $T(x,y)$  применялся следующий подход: все пиксели с температурами, лежащими в интервале  $0.6T_{max} > T > 0.2T_{max}$ , сортировались по температуре и разбивались на блоки по 50 штук. В каждом таком блоке вычислялась средняя температура и проводилась линейная регрессия в координатах  $(x^2, y^2)$  с целью определения полуосей эллипса изотермы;

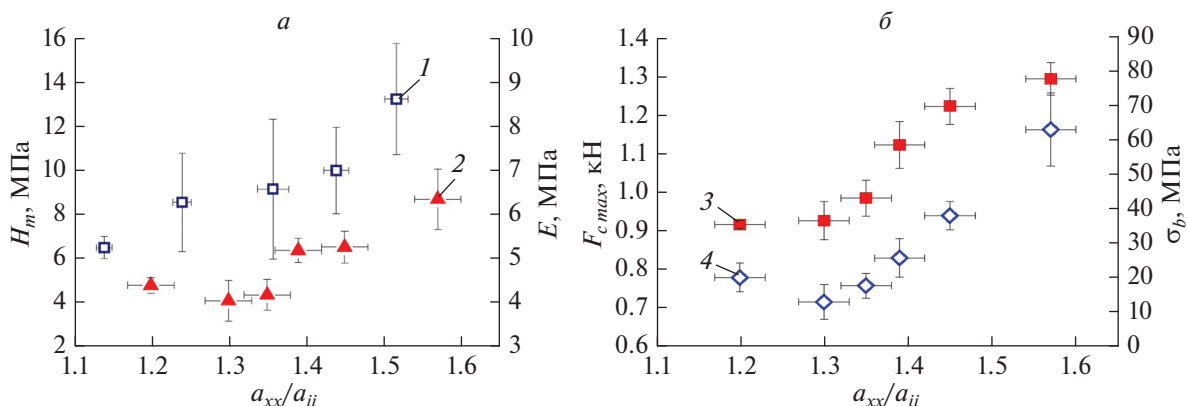
8) аппроксимация полученного экспериментального пространственного распределения температуры вдоль главных осей эллипса  $T(x_i)$  функцией

$$\text{вида } T(x_i, t) = \frac{B}{x_i} \operatorname{erfc}\left(\frac{x_i}{2\sqrt{a_i^* t}}\right), \operatorname{erfc}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_y^\infty e^{-z^2} dz$$

путем минимизации суммы квадратов отклонений симплекс методом Нелдера–Мида. Вычисленные таким способом величины  $a_i^*$ , представляющие собой температуропроводности вдоль главных осей  $i$ , вычисленные согласно модели, разработанной для изотропного материала, усреднялись для всех кадров в некотором интервале времени с наименьшими вариациями значений  $a_i^*$ ;

9) исходя из величин  $a_i^*$ , полученных при точечном нагреве на разных поверхностях изучаемого образца, вычислялись истинные значения  $a_{ii}$  по формулам  $a_{xx} = a_x^{*3/5} a_y^{*1/5} a_z^{*1/5}$ ;  $a_{yy} = a_y^{*3/5} a_x^{*1/5} a_z^{*1/5}$ ;  $a_{zz} = a_z^{*3/5} a_x^{*1/5} a_y^{*1/5}$ .

Обработанные результаты механических и тепловых испытаний показаны на рис. 3. Из них следует, что изменение влажности  $w$  в интервале от 10 до 45% существенно влияет на все регистрировавшиеся механические характеристики, но



**Рис. 4.** Связь механических свойств древесины и компонент тензора КТП.  $a_{xx}/a_{ii}$  ( $i = y, z$ ) – Отношение температуропроводности вдоль волокон к температуропроводности поперек. 1 – Твердость  $H_m$ , 2 – модуль Юнга  $E$ , 3 – предел прочности  $\sigma_b$ , 4 – максимальная сила  $F_{c\ max}$  при раскалывании.

несколько по-разному. Наибольшее влияние изменение  $w$  оказывало на  $H_A$  и  $\sigma_b$ , а наименьшее – на  $H_B$  и  $H_C$ . В диапазоне  $w$  от 45 до 65% вариации механических характеристик не превышали случайной погрешности. В целом эти результаты совпадают с известными из литературы [1, 3, 7–9].

Абсолютные и относительные значения  $a_{ij}$  по-разному зависели от  $w$  на различных срезах и направлениях в образце. Так, компонента тензора  $a_{ij}$  вдоль волокон существенно зависела от  $w$ , а компоненты тензора поперек волокон были практически независимы от влажности (рис. 3б), что позволяет использовать последние для калибровки метода. Еще более очевидно эти особенности проявляются для относительных значений главных компонент тензора  $a_{ij}$ . На рис. 4 показаны зависимости  $\sigma_b$ ,  $F_c$ ,  $E$ , и  $H_m$  от компонент тензора температуропроводности  $a_{ij}$ . Здесь  $H_m = (H_A + H_B)/2$  – усредненные по двум боковым граням значения твердости (они были статистически неразличимы). Из представленных графиков следует, что между механическими и тепловыми характеристиками имеется динамическая связь.

Таким образом, в работе представлены результаты комплексного исследования теплофизических и механических характеристик древесины сосны различной влажности с учетом анизотропии этих свойств. Эти результаты доказывают, что имеется принципиальная возможность установить достоверную и надежную взаимосвязь ряда механических характеристик древесины с температуропроводностью, бесконтактно измеряемой разработанными нами экспресс-методами (в среднем они требуют  $\sim 1$  мин на измерение). Развитые подходы и полученные данные позволяют сделать характеризацию древесины более полной и проводить оценку механических свойств путем бесконтактного неразрушающего

определения ТФХ без вырезки образцов определенных размеров и формы. В перспективе это позволит разрабатывать технические средства для дистанционной неразрушающей оценки механических характеристик, как изотропных, так и анизотропных материалов путем бесконтактного определения ТФХ.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00602) с привлечением ресурсов МГУ им. М.В. Ломоносова и оборудования ЦКП Тамбовского государственного университета им. Г.Р. Державина.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meyers M.A., Chen P.-Y., Lin A.Y.-M., Seki Y. // *Progr. Mater. Sci.* 2008. V. 53. P. 1.
2. Pickering K.L., Efendy M.G.A., Le T.M. // *Compos. A.* 2016. V. 83. P. 98.
3. Hsueh C.-H., Schmauder S., Chen C.-S., Chawla K.K. *Handbook of mechanics of materials.* Springer Nature. Singapore Pte. Ltd., 2019. 2431 p.
4. Hull D., Clyne T.W. *An introduction to composite materials.* Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2019. 346 p.
5. Luan C., Movva S., Wang K. et al. // *Funct. Compos. Struct.* 2019. V. 1. Art. No. 042002.
6. Rajak D.K., Pagar D.D., Menezes P.L., Linul E. // *Polymers.* 2019. V. 11. Art. No. 1667.
7. Pickering K.L., Efendy M.G.A., Le T.M. // *Compos. A.* 2016. V. 83. P. 98.
8. Mvondo R.R.N., Meukam P., Jeong J. et al. // *Res. Phys.* 2017. V. 7. P. 2096.
9. Kretschmann D.E. In: *General technical report FPL–GTR–190.* Ch. 5. Madison: U.S. Dep. of Agriculture, Forest Service, Forest Prod. Lab., 2010. P. 5.1.
10. Fournier M., Dlouha J., Jaouen G., Almeras T. // *J. Exp. Bot.* 2013. V. 64. No. 15. P. 4793.
11. Головин Ю.И., Тюрин А.И., Головин Д.Ю. и др. // *ПЖТФ.* 2021. Т. 47. № 2. С. 45; Golovin Y.I., Tyurin A.I.,

- Golovin D. Yu. et al.* // Tech. Phys. Lett. 2021. V. 47. No. 1. P. 92.
12. Головин Д.Ю., Тюрин А.И., Самодуров А.А., Дивин А.Г., Головин Ю.И. Динамические термографические методы неразрушающего экспресс-контроля. М.: Техносфера, 2019. 214 с.
13. *Golovin D. Yu., Divin A. G., Samodurov A. A. et al.* Failure analysis. London: InTech, 2019. P. 124.
14. Головин Ю.И., Тюрин А.И., Головин Д.Ю., Самодуров А.А. Способ определения кинетических тепло- физических свойств твердых материалов. Пат. РФ № 2701775. 2019.
15. Головин Ю.И., Самодуров А.А., Тюрин А.И. и др. Устройство для бесконтактного определения теплофизических свойств твердых тел. Пат. РФ № 2701881. 2019.
16. Головин Д.Ю., Дивин А.Г., Самодуров А.А. и др. // Инж.-физ. журн. 2020. Т. 93. № 1. С. 240. *Golovin D. Yu., Divin A. G., Samodurov A. A. et al.* // J. Engin. Phys. Thermophys. V. 93. No. 1. P. 234.

## Correlation between mechanical and thermal physical properties of common pine wood (*Pinus sylvestris L*)

Yu. I. Golovin<sup>a, b, \*</sup>, D. Yu. Golovin<sup>a</sup>, A. A. Samodurov<sup>a</sup>, A. I. Tyurin<sup>a</sup>, D. A. Kabanov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Nanotechnology and Nanomaterials Research Institute, Tambov State University, Tambov, 392000 Russia

<sup>b</sup>Chemical department, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

\*e-mail: yugolovin@yandex.ru

Correlations between mechanical properties and anisotropy of thermal physical properties of common pine (*Pinus sylvestris L*) wood with various humidity have been found. It renders possible to substitute the evaluation of material's mechanical properties typically requiring labor and material consuming destructive testing with express non-destructive measurement of its thermal properties using remote technique of transient thermal imaging.