

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ТЕРМИЧЕСКИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

М.Г. Ермоченков, А.Г. Евстигнеев

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

ermochenkov@mgul.ac.ru

Термическое модифицирование древесины широко используется для улучшения ее свойств. Применение термически модифицированной древесины в качестве отделочного и конструкционного материала предполагает наличие информации о ее теплофизических и физико-механических свойствах, в том числе о теплопроводности. Нагрев без доступа окислителя приводит к деструкции материала, которая вызывает изменение состава и структуры и, как следствие, свойств. Термодеструкция является многостадийным процессом. Степень разложения материала зависит от температуры, времени и кинетических параметров каждой стадии процесса. В статье приведены результаты исследований теплопроводности древесины и ее изменений при термообработке. Разработана и изготовлена экспериментальная установка для определения коэффициентов теплопроводности различных материалов, в которой реализован метод стационарного плоского слоя. Проведены экспериментальные исследования теплопроводности образцов древесины сосны, ели и березы. Образцы изготавливались из необработанной древесины и из древесины, подвергшейся термической деструкции. Режимы отжига исходных материалов определялись с учетом кинетических параметров термодеструкции соответствующих пород древесины. Для математического описания теплопроводности древесины и ее изменений в процессе термообработки предложено использовать методы теории обобщенной проводимости, модель материалов со взаимопроницаемыми структурами. Такой подход позволяет учитывать изменение состава и структуры материала, его влажности, а также состав и свойства газофазных продуктов в порах древесины. Проведено сравнение результатов экспериментальных и расчетных исследований коэффициентов теплопроводности образцов из древесины березы, сосны и ели при разных значениях влажности и степени термической деструкции. Показано удовлетворительное совпадение результатов расчетов и экспериментов.

Ключевые слова: древесина, термическая деструкция, модифицирование, кинетические параметры, коэффициент теплопроводности

Ссылка для цитирования: Ермоченков М.Г., Евстигнеев А.Г. Теплопроводность термически модифицированной древесины // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 5. С. 69–74.
DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-69-74

Древесина — это природный композиционный материал. Она широко используется в качестве конструкционного и отделочного материала. Древесина обладает рядом достоинств и недостатков. Для улучшения свойств ее подвергают модифицированию. В настоящее время все более широкое применение находит термическое модифицирование. Это процесс деструкции древесины при высокой температуре без доступа кислорода. В результате изменяются состав, структура и свойства материала. При использовании термодревесины в качестве строительного материала большое значение имеет информация о ее теплофизических свойствах. Таким образом, целью исследования является разработка метода прогнозирования теплопроводности термически модифицированной древесины.

Методы и исследования

Были проведены исследования теплопроводности древесины, модифицированной при различных режимах. Степень модифицирования определяется интенсивностью и временем теплового воздействия. Термическая деструкция рассматривается как сложный многостадийный физико-химический

процесс. Скорость протекания многостадийного процесса описывается уравнением [1–5]

$$\frac{d\omega_j}{d\tau} = \sum_{j=1}^m \omega_j^{n_j} A_j \exp\left(-\frac{E_j}{RT}\right), \quad (1)$$

где j — номер стадии;

m — число стадий;

ω_j — безразмерная масса стадии;

n_j — порядок реакции j -й стадии;

A_j — частотный фактор j -й стадии, с^{-1} ;

E_j — энергия активации j -й стадии, Дж/моль;

R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль · К);

T — температура, К.

Кинетические параметры A , E и ω определяют по результатам термогравиметрических экспериментов [5–9]. Метод обработки результатов экспериментальных исследований для получения постадийных кинетических параметров приведен в работах [2, 10–12].

Относительная масса стадии может быть определена из соотношения [2, 3, 11]

$$\omega_{j,\gamma}(T, \tau) = \omega_{0,\gamma} \exp\left[-A_{j,\gamma} \int_0^{\tau} \exp\left(-\frac{E_{j,\gamma}}{RT}\right) d\tau\right], \quad (2)$$

Относительная масса образца

$$\omega(T, \tau) = \sum_{\gamma} \omega_{0,\gamma} \exp \left[-A_{\gamma} \int_0^{\tau} \exp \left(-\frac{E_{\gamma}}{RT} \right) d\tau \right]. \quad (3)$$

Результаты исследований кинетики термической деструкции древесины приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Кинетические параметры термической деструкции древесины
Kinetic parameters of thermal destruction of wood

Но- мер ста- дии	Береза			Сосна		
	На- чаль- ная масса стадии ω_0	Энергия акти- вации $E/R, K$	Частотный фактор $A,$ c^{-1}	На- чаль- ная масса стадии, ω_0	Энергия акти- вации, $E/R, K$	Частотный фактор, $A,$ c^{-1}
1	0,164	21 274	$3,666 \cdot 10^{14}$	0,023	13 941	$2,987 \cdot 10^9$
2	0,246	26 006	$7,347 \cdot 10^{16}$	0,077	19 460	$7,567 \cdot 10^{12}$
3	0,216	17 997	$4,988 \cdot 10^{10}$	0,606	17 991	$3,319 \cdot 10^{10}$
4	0,179	5 823	10,448	0,134	8 535	571
5	0,195	10 049	500,765	0,160	11 793	$3,005 \cdot 10^3$

Для учета зависимости коэффициента теплопроводности термически модифицированной древесины от плотности, влажности, степени термической деструкции, состава газовой фазы в порах и температуры удобно воспользоваться методами теории обобщенной проводимости — формулой для материалов со взаимопроникающими компонентами [13]:

$$\lambda = \lambda_1 \left[C^2 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} (1 - C)^2 + 2 \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{C(1 - C)}{\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} C + 1 - C \right)} \right], \quad (4)$$

$$C = 0,5 + A \cos \omega / 3, \quad (5)$$

$$A = -1; \varphi = 2\pi - \arccos(1 - 2r_2) \text{ при } 0 \leq r_2 \leq 0,5, \quad (6)$$

$$A = 1; \varphi = 2\pi - \arccos(2r_2 - 1) \text{ при } 0,5 < r_2 \leq 1. \quad (7)$$

Определение коэффициента теплопроводности осуществляется как последовательный расчет теплопроводности бинарных смесей.

Значения истинных (при нулевой пористости) коэффициентов теплопроводности каждого из компонентов могут быть рассчитаны по формулам

$$\lambda_{и} = \frac{-(\lambda_{в} C^3 + \lambda_{в} d^3 - \lambda_{эф} d + 2\lambda_{в} C d)}{2C^2 d} \pm \frac{\sqrt{(\lambda_{в} C^3 + \lambda_{в} d^3 - \lambda_{эф} d + 2\lambda_{в} C d)^2 - 4C^2 d (\lambda_{в}^2 C d^2 - \lambda_{эф} \lambda_{в} C)}}{2C^2 d} \times \frac{\sqrt{-4C^2 d (\lambda_{в}^2 C d^2 - \lambda_{эф} \lambda_{в} C)}}{2C^2 d}. \quad (8)$$

Здесь $\lambda_{и}$ — истинный коэффициент теплопроводности материала;

$\lambda_{в}$ — коэффициент теплопроводности воздуха в порах материала;

$\lambda_{эф}$ — эффективный коэффициент теплопроводности материала;

$$d = 1 - C, \quad C = 0,5 + A \cos \omega / 3, \quad (9)$$

$$A = (-1); \varphi = 2\pi - \arccos(1 - 2\Pi) \text{ при } 0 \leq \Pi \leq 0,5,$$

$$A = 1; \varphi = 2\pi - \arccos(2\Pi - 1), \text{ при } 0,5 \leq \Pi \leq 1, \quad (10)$$

где Π — пористость исследуемых образцов.

Экспериментальные исследования теплопроводности проводились методом стационарного плоского слоя. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Образец 1 исследуемого материала в форме цилиндра диаметром 100 мм или менее и высотой 2...5 мм устанавливается на рабочую поверхность холодильника 10. Холодильник служит для отвода теплоты, проходящей через образец, и создания перепада температур. Он изготовлен из меди, так как она имеет теплопроводность, более чем на три порядка превышающую теплопроводность исследуемых материалов, и обеспечивает интенсивный отвод теплоты от зоны контакта с образцом. Холодильник имеет массу более 40 кг и, вследствие этого, большую теплоемкость, что обуславливает практическую неизменность его температуры при проведении экспериментального исследования.

Для создания теплового потока через исследуемый образец на него устанавливается электрический нагреватель 2. Перепад температур на образце измеряется дифференциальной термопарой 11. Возникающая в термопаре термо-ЭДС регистрируется с помощью цифрового мультиметра 5 типа АРРА109. Исследуемый образец с нагревателем находится внутри охранного нагревателя 4, что предотвращает потери теплоты с верхних и боковых поверхностей. Между основным и охранным нагревателями создается зазор с помощью кольцевой прокладки 3, изготовленной из теплоизоляционного материала. Термопара 8 контролирует разность температур между верхней поверхностью основного и нижней поверхностью охранный нагревателей. Величина вкладываемой в охранный нагреватель мощности регулируется прецизионным задатчиком температуры 7 типа РИФ-101 и обеспечивает нулевую разность температур. Свободные концы термопар 11 и 8 подведены к термостатированному переключателю 6. Для уменьшения влияния на результаты экспериментальных исследований теплопроводности случайных факторов, связанных с возможными изменениями режимов конвективных потоков в зоне установки, рабочий участок накрыт стеклянным колпаком 9.

Образец из исследуемого материала помещается на рабочую поверхность холодильника, сверху на него устанавливается нагреватель. Места

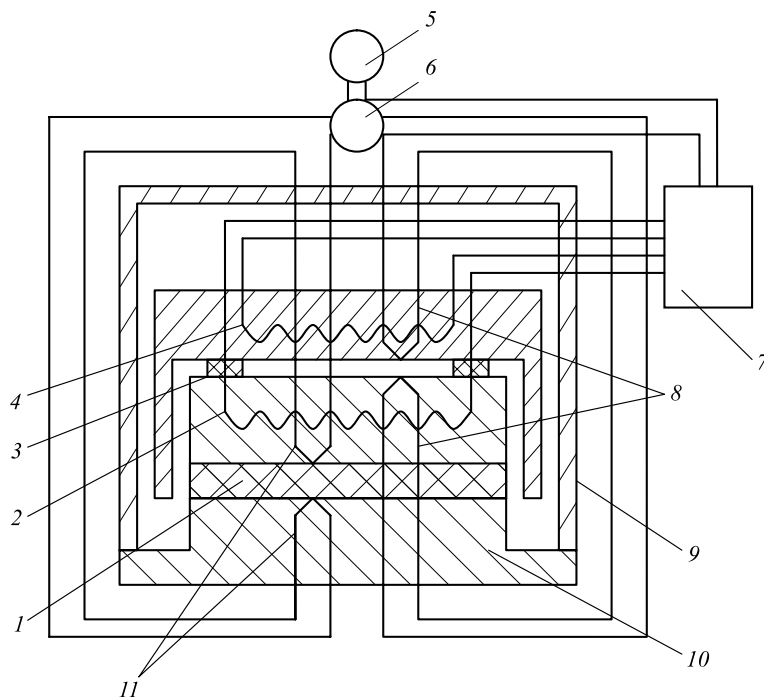


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения коэффициентов теплопроводности композиционных материалов

Fig. 1. Diagram of the experimental setup for determining the coefficients of thermal conductivity of composite materials

контактов образца с поверхностью холодильника и нагревателя смазываются тонким слоем консистентной смазки. Для создания и поддержания стационарного теплового режима нагреватель подключен к стабилизированному источнику постоянного тока. Мощность нагревателя задается с таким расчетом, чтобы перепад температур на внешних поверхностях образца составлял 1...8 К.

Коэффициент теплопроводности древесины определяется из соотношения

$$\lambda = \frac{q\delta}{(T_{w1} - T_{w2})}. \quad (11)$$

Здесь δ — толщина образца, м;

T_{w1} и T_{w2} — температуры внешних поверхностей образца, К;

q — плотность удельного теплового потока, Вт/м²,

$$q = \frac{IU}{F_{обр}}, \quad (12)$$

где I — сила тока, проходящего через нагреватель, А;

U — падение напряжения на нагревателе, В;

$F_{обр}$ — площадь поверхности образца, м².

Результаты и обсуждение

Были проведены экспериментальные исследования теплопроводности древесины различных пород.

Сосновые образцы изготавливались из древесины, модифицированной в масляной среде при температуре $T = 210$ °С, время нагрева $\tau = 4$ ч. Плотность сухого материала до модифицирования составляла $\rho_{нач} = 476$ кг/м³. Графики изменения относительных масс отдельных стадий приведены на рис. 2. Определялись плотность образцов из модифицированной древесины, коэффициент теплопроводности и влажность. Расчет коэффициентов теплопроводности образцов древесины проводился по соотношениям (4)–(7). Результаты экспериментальных и расчетных исследований приведены в табл. 2.

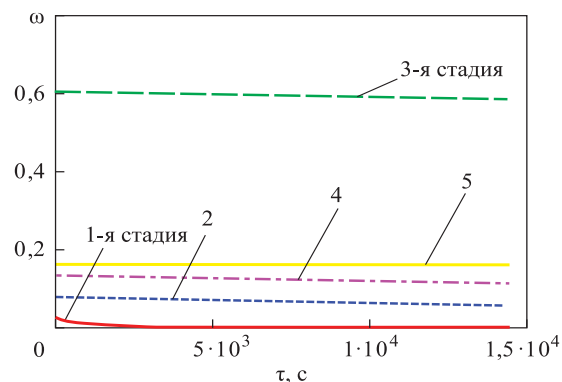


Рис. 2. Зависимость относительных масс отдельных стадий термической деструкции древесины сосны ($T = 210$ °С) от времени

Fig. 2. Time dependences of relative masses of individual stages of thermal destruction of pine wood ($T = 210$ °С)

Т а б л и ц а 2

Результаты экспериментальных и расчетных исследований теплопроводности древесины
Results of experimental calculating studies of the thermal conductivity of wood

Древесина	Температура нагрева, °С	Время нагрева, ч	Начальная плотность, кг/м ³	Текущая плотность, кг/м ³	Текущая влажность, %	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К)	
						Расчетное значение	Экспериментальное значение
Сосна	210	4	476	438	1,8	0,115	0,114
	210	4	476	459	2,0	0,116	0,114
	210	4	476	431	1,8	0,116	0,112
Ель	230	5,5	414	317	4,5	0,101	0,099
	230	5,5	414	302	3,0	0,092	0,094
Сосна	–	–	546	–	7	0,16	0,15
Береза	–	–	644	–	9	0,19	0,18
	–	–	635	–	10	0,20	0,19

Древесина ели модифицировалась в масляной среде при температуре $T = 230\text{ }^{\circ}\text{C}$, время нагрева $\tau = 5,5\text{ ч}$.

На рис. 3 приведены графики зависимости от времени относительных масс отдельных стадий деструкции древесины ели.

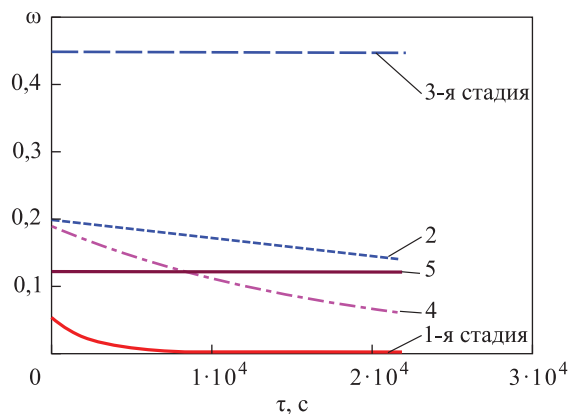


Рис. 3. Зависимость относительных масс отдельных стадий термической деструкции древесины ели ($T = 230\text{ }^{\circ}\text{C}$) от времени

Fig. 3. Time dependence of relative masses of individual stages of thermal destruction of spruce wood ($T = 230\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Начальная плотность древесины ели в абсолютно сухом состоянии составляла $\rho_{\text{нач}} = 414\text{ кг/м}^3$. Результаты экспериментальных исследований коэффициента теплопроводности, плотности и влажности образцов приведены в табл. 2.

В этой же табл. 2 представлены результаты экспериментальных и расчетных исследований теплопроводности древесины, не подвергшейся модифицированию (у нее в графах «Температура нагрева», «Время нагрева» и «Текущая плотность» стоят прочерки).

Анализ экспериментальных и расчетных данных позволяет сделать вывод, что модель (4)–(7) удовлетворительно описывает зависимость теплопроводности древесины от ее плотности и влажности.

На рис. 4 представлены графики зависимости коэффициента теплопроводности древесины от ее плотности. Определялась теплопроводность древесины для разных значений влажности. Рассчитывались коэффициенты теплопроводности при влажности $W = 0, 10, 20$ и $50\text{ }\%$.

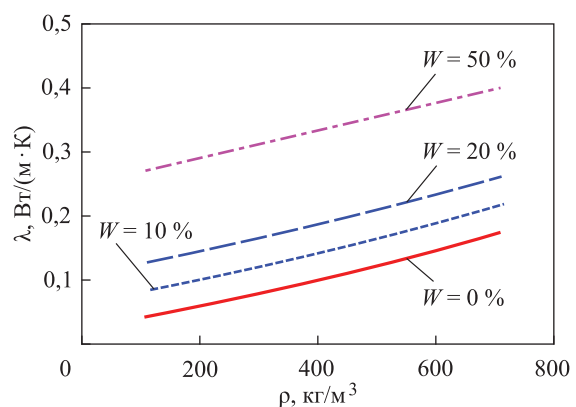


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопроводности древесины от плотности при разных значениях влажности

Fig. 4. Graphs of the dependence of the thermal conductivity of wood on density at different values of humidity

На рис. 5 приведены графики зависимости коэффициента теплопроводности древесины от влажности. Представлены зависимости для древесины с плотностью в абсолютно сухом состоянии $\rho = 420\text{ кг/м}^3$, что соответствует плотности ели, $\rho = 480\text{ кг/м}^3$ (плотность сосны) и $\rho = 620\text{ кг/м}^3$ (плотность березы).

Анализ результатов экспериментальных и расчетных исследований позволяет сделать вывод о том, что зависимость коэффициента теплопроводности древесины от плотности и влажности носит сложный характер. Несмотря на близость значений коэффициента теплопроводности воды ($\lambda = 0,68\text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$) и коэффициента теплопроводности вещества стенок древесных клеток ($\lambda = 0,65\text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$), определенного по формулам

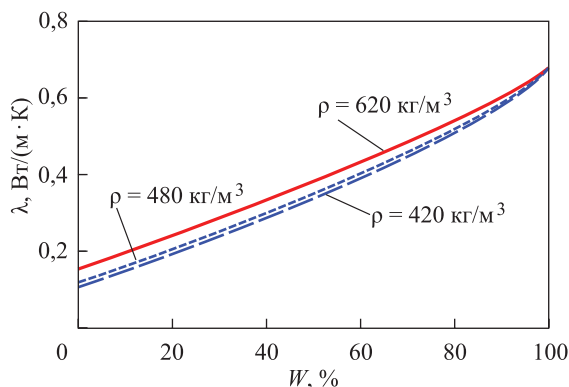


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопроводности древесины от влажности при разных значениях плотности

Fig. 5. Graphs of the dependence of the thermal conductivity of wood from humidity at different density values

теории обобщенной проводимости (8)–(10), коэффициенты теплопроводности сухой и влажной древесины при равенстве значений их плотности существенно различаются. Задача осложняется зависимостью теплопроводности воды и древесного вещества от температуры.

Коэффициенты теплопроводности воды и воздуха с увеличением температуры возрастают. Таким образом, необходимо ввести зависимость истинных коэффициентов теплопроводности всех этих компонентов от температуры материала.

Передача теплоты через слой влажной древесины может осуществляться как кондуктивными, так и конвективными потоками. Конвективный перенос теплоты связан с испарением влаги в слоях с более высокой температурой, диффузией и конденсацией пара в слоях с низкой температурой. Таким образом, коэффициенты теплопроводности влажной древесины являются эффективными. На основании данных, приведенных на диаграмме коэффициента теплопроводности древесины березы поперек волокон при базисной плотности $\rho_6 = 500 \text{ кг/м}^3$ [14], и теплофизических свойств сухого воздуха и воды получены соотношения для аппроксимации зависимости от температуры истинных коэффициентов теплопроводности воздуха и влаги:

$$\lambda_{\text{воз}} = 0,026 + 6 \cdot 10^{-5}t; \quad (13)$$

$$\lambda_{\text{вод}} = 0,551 + f(W)t; \quad (14)$$

где

$$f(W) = 0,033 - 4,05 \cdot 10^{-4}W + 1,57 \cdot 10^{-6}W^2. \quad (15)$$

Сведения об авторах

Ермоченков Михаил Геннадьевич — канд. техн. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), ermochenkov@mgul.ac.ru

Евстигнеев Алексей Георгиевич — зав. лабораторией, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), evstigneev@mgul.ac.ru

Выводы

Модель теплопроводности среды со взаимопроникающими структурами (4)–(7) и (13)–(15) позволяет определить коэффициент теплопроводности древесины как функцию плотности, влажности, температуры материала и теплопроводности газовой среды в порах. Проведена экспериментальная проверка предложенной модели. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало, что их расхождение не превышает 10 %.

Список литературы

- [1] Ермоченков М.Г. Прогнозирование свойств термически модифицированной древесины // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2010. № 4 (73). С. 111–115.
- [2] Ермоченков М.Г., Евстигнеев А.Г., Кувик Т.Е. Термогравиметрические исследования кинетики термической сушки древесины // Научн. тр. МГУЛ. М.: МГУЛ, 2007. Вып. 335. С. 36–46.
- [3] Жигунов С.В. Тепломассообмен и кинетика термодеструкции при высокотемпературном нагреве композиционных материалов: Дис. ... канд. техн. наук: 05.14.05.. М.: МГУЛ, 1990. 184 с.
- [4] Grieco E., Baldi G. Analysis and modelling of wood pyrolysis // Chemical Engineering Science, 2011, v. 66, iss. 4, pp. 650–660.
- [5] Pétrissans A., Younsi R., Chaouch M., Gérardin P., Pétrissans M. Wood thermodegradation: experimental analysis and modeling of mass loss kinetics // Maderas-Ciencia y Tecnologia, 2014, v. 16, iss. 2, pp. 133–148.
- [6] Кислицын А.Н. Пиролиз древесины: химизм, кинетика, продукты, новые процессы. М.: Лесная пром-сть, 1990. 312 с.
- [7] Корякин В.И. Термическое разложение древесины. Л.: Гослесбумиздат, 1962. 678 с.
- [8] Slopicka K., Bartocci P., Fantozzi F. Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis // 3rd Int. Conf. on Applied Energy (ICAEE), Perugia, Italy, 2011 // Applied Energy, 2012, v. 97, pp. 491–497.
- [9] Hongbo Yu, Fang Liu, Ming Ke, Xiaoyu Zhang. Thermogravimetric analysis and kinetic study of bamboo waste treated by Echinodontium taxodii using a modified three-parallel-reactions model // Bioresource Technology, 2015, v. 185, pp. 324–330.
- [10] Кувик Т.Е. Кинетика термической деструкции древесины в приложении к прогнозированию свойств термически модифицированной древесины // Матер. IV Междунар. науч.-практ. конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)». М.: МГАУ, 2011. Т. 2. С. 144–148.
- [11] Шведов Б.А. Энерго- и массообмен в материалах тепловой защиты многоразовых ракетно-космических систем: Дис. ... д-ра техн. наук. М.: МЛТИ, 1990. 542 с.
- [12] Эмануэль Н.М., Кнорре Д.Г. Курс химической кинетики. М.: Высшая школа, 1974.
- [13] Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов: Справочная книга. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
- [14] Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения: Учебник для лесотехнических вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Лесная пром-сть, 1980. 208 с.

Статья поступила в редакцию 08.06.2017 г.

HEAT CONDUCTIVITY OF THERMALLY MODIFIED WOOD

M.G. Ermochenkov, A.G. Evstigneev

BMSTU (Mytishchi branch), 1 st. Institutskaya, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia
ermochenkov@mgul.ac.ru

Thermal modification of wood is widely used to improve its properties. The use of thermally modified wood as finishing and structural materials presumes the availability of information on its thermophysical and physical-mechanical properties including thermal conductivity. Heating without access to the oxidant leads to the destruction of the material which causes a change in the composition and structure and properties as a consequence. Thermal destruction is a multi-stage process. The degree of decomposition of the material depends on the temperature, time and kinetic parameters of each stage of the process. The article presents the results of the investigation of the thermal conductivity of wood and its changes during heat treatment. An experimental setup to determine the coefficients of thermal conductivity in various materials was developed and fabricated, in which the stationary plane layer method was realized. Experimental studies of the thermal conductivity of samples of pine, spruce and birch wood have been carried out. Samples were made from unprocessed wood and from wood subjected to thermal destruction. The annealing conditions of the initial materials were determined taking into account the kinetic parameters of the thermal destruction of the corresponding wood species. For the mathematical description of the thermal conductivity of wood and its variation in the heat treatment process, it is offered to use methods of the theory of generalized conductivity, a model of materials with interpenetrating structures. This approach allows to take into account changes in the composition and structure of the material, its moisture content, as well as the composition and properties of gas phase products in wood pores. The results of experimental and calculated studies of the thermal conductivity coefficients of samples from birch, pine and spruce wood under different humidity and the degree of thermal degradation were compared. A satisfactory agreement between the results of calculations and experiments is shown.

Keywords: wood, thermal destruction, modification, kinetic parameters, coefficient of thermal conductivity

Suggested citation: Ermochenkov M.G., Evstigneev A.G. *Teploprovodnost' termicheski modifitsirovannoy drevesiny* [Heat conductivity of thermally modified wood]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 5, pp. 69–74. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-69-74

References

- [1] Ermochenkov M.G. *Prognozirovanie svoystv termicheski modifitsirovannoy drevesiny* [Forecasting the properties of thermally modified wood] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2010, no. 4 (73), pp. 111–115.
- [2] Ermochenkov M.G., Evstigneev A.G., Kuvik T.E. *Termogravimetricheskie issledovaniya kinetiki termicheskoy sushki drevesiny* [Thermogravimetric studies of the kinetics of thermal drying of wood] *Scientific Works MSFU. Moscow: MGUL*, 2007, v. 335, pp. 36–46.
- [3] Zhigunov S.V. *Teplomassoobmen i kinetika termodestruktsii pri vysokotemperaturnom nagreve kompozitsionnykh materialov: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Heat and mass transfer and kinetics of thermal degradation during high-temperature heating of composite materials: dis. ... Cand. Sci. (Tech.)]. Moscow: MGUL, 1990. 184 p.
- [4] Grieco E., Baldi G. Analysis and modulating of wood pyrolysis. *Chemical Engineering Science*, 2011, v. 66, Iss. 4, pp. 650–660.
- [5] Pétrissans A., Younsi R., Chaouch M., Gérardin P., Pétrissans M. Wood thermodegradation: experimental analysis and modeling of mass loss kinetics. *Maderas-Ciencia y Tecnologia*, 2014, v. 16, Iss. 2, pp. 133–148.
- [6] Kislitsyn A.N. *Piroliz drevesiny: khimizm, kinetika, produkty, novye protsessy* [Pyrolysis of wood: chemistry, kinetics, products, new processes]. Moscow: Lesnaya prom-st [Forest Industry], 1990, 312 p.
- [7] Koryakin V.I. *Termicheskoe razlozhenie drevesiny* [Thermal decomposition of wood]. Leningrad: Goslesbumizdat, 1962, 678 p.
- [8] Słopiecka K., Bartocci P., Fantozzi F. Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis. 3rd Int. Conf. on Applied Energy (ICAIE), Perugia, Italy, 2011. *Applied Energy*, 2012, v. 97, pp. 491–497.
- [9] Hongbo Yu, Fang Liu, Ming Ke, Xiaoyu Zhang. Thermogravimetric analysis and kinetic study of bamboo waste treated by *Echinodontium taxodii* using a modified three-parallel-reactions model. *Bioresource Technology*, 2015, v. 185, pp. 324–330.
- [10] Kuvik T.E. *Kinetika termicheskoy destruktsii drevesiny v prilozhenii k prognozirovaniyu svoystv termomodifitsirovannoy drevesiny* [Kinetics of thermal destruction of wood in application to forecasting the properties of thermomodified wood]. Proceedings IV Intern. scientific-practical conference «Modern energy-saving thermal technologies (drying and thermal treatment of materials)». Moscow: MGAU, 2011, v. 2, pp. 144–148.
- [11] Shvedov B.A. *Energo- i massoobmen v materialakh teplovoy zashchity mnogorazovykh raketno-kosmicheskikh sistem: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Energy and mass transfer in the materials of thermal protection of reusable rocket and space systems: dis. ... Dr. Sci. (Tech.)]. Moscow: MLTI, 1990. 542 p.
- [12] Emanuel' N.M., Knorre D.G. *Kurs khimicheskoy kinetiki* [Course of chemical kinetics]. Moscow: High School, 1974.
- [13] Dul'nev G.N., Zarichnyak Yu.P. *Teploprovodnost' smesey i kompozitsionnykh materialov* [Thermal conductivity of mixtures and composite materials]. Leningrad: Energia, 1974, 264 p.
- [14] Ugolev B.N. *Drevesinovedenie s osnovami lesnogo tovarovedeniya* [Wood Science with the Basics of Forest Goods Science]. Moscow: Lesnaya prom-st [Forest Industry], 1980, 208 p.

Author's information

Ermochenkov Mikhail Gennad'evich — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof., BMSTU (Mytishchi branch), ermochenkov@mgul.ac.ru

Evstigneev Aleksey Georgievich — Head. of laboratory of the BMSTU (Mytishchi branch), evstigneev@mgul.ac.ru

Received 08.06.2017