

## ИЗМЕНЕНИЕ ЦВЕТА ДРЕВЕСИНЫ БЕРЕЗЫ ПРИ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

кандидат технических наук, доцент **М.Г. Ермоченков**<sup>1</sup>

кандидат технических наук, доцент **А.В. Хроменко**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»

(национальный исследовательский университет),

Мытищинский филиал, Мытищи, Российская Федерация

Для улучшения свойств древесины широко используется ее термическая обработка. К таким технологическим процессам относятся сушка и термическое модифицирование. Термомодифицирование – это нагрев древесины без доступа кислорода, сопровождающийся ее термической деструкцией. Термически модифицированная древесина может использоваться в качестве конструкционных и отделочных материалов. Это ставит задачу определения ее теплофизических, физико-химических, биологических и декоративных свойств, а также их изменения при термической обработке. В статье приведены результаты экспериментально-расчетных исследований цветовых характеристик древесины березы, их изменение в процессе термического модифицирования. Термодеструкция является сложным многостадийным физико-химическим процессом. Термическое разложение материала вызывает изменение его состава, структуры, что сопровождается изменением его свойств. Древесину можно рассматривать как многокомпонентный композиционный материал, состоящий из гемицеллюлозы, целлюлозы, лигнина и др. компонентов. Каждый из компонентов разлагается в своем диапазоне температур, что обуславливает многостадийность процесса термической деструкции. Степень термической деструкции материала определяется кинетикой протекания каждой стадии и степенью ее завершенности. Кинетика термического разложения древесины может быть определена по результатам термогравиметрических экспериментов. В статье предложена модель определения цветовых характеристик древесины как функции степени завершенности отдельных стадий термической деструкции. Для идентификации использована модель разложения цвета на RGB составляющие была выполнена идентификация цвета образцов исходной древесины березы в RGB координатах. Определены параметры термического воздействия, позволяющие получить древесину с заданной степенью термического разложения. Проведена термообработка образцов и идентификация их цвета. Исследована зависимость RGB параметров от времени и интенсивности термообработки. Получены в явном виде эмпирические соотношения для определения идентифицирующих характеристик цвета как функций степени завершенности стадий термодеструкции в системах RGB и LAB.

**Ключевые слова:** древесина, термическое модифицирование, идентификация цвета, цветовые характеристики, кинетические параметры.

## COLOR CHANGE OF BIRCH WOOD DURING THERMAL EXPOSURE

PhD (Engineering), Associate Professor **M. G. Ermachenkov**<sup>1</sup>

PhD (Engineering), Associate Professor **A.V. Khromenko**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – Mytischki Branch, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bauman Moscow State

Technical University» (National Research University), Mytischki, Russian Federation

### Abstract

Heat treatment is widely used to improve the properties of wood. Such processes include drying and thermal modification. Thermal modification is heating wood without oxygen, accompanied by heat destruction. Thermally modified wood can be used as structural and finishing materials. This puts the task of determining its thermal and physical, physical and chemical, biological, and ornamental properties and their change during heat treatment. The article

presents the results of experimental and computational studies of color characteristics of the wood of birch, their change in the process of thermal modification. Thermal decomposition is a complicated multi-stage physical and chemical process. Thermal decomposition of material causes changes in its composition, structure, accompanied by alterations of its properties. Wood can be considered as a multicomponent composite material, consisting of hemicellulose, cellulose, lignin and other components. Each component decomposes in the temperature range that causes the multistage process of thermal degradation. The degree of thermal degradation of the material is determined by the kinetics of occurrence of each stage and the degree of its perfection. Thermal decomposition kinetics of wood can be determined by the results of thermal and gravimetric experiments. In the article the model of determining the color characteristics of wood as a function of the degree of completion of individual stages of thermal degradation is suggested. Model of decomposition of color for RGB components is used for identifying. Color identification of the samples of original birch wood in RGB coordinates was performed. The parameters of thermal effects, allowing to obtain wood with given degree of thermal decomposition are defined. Heat treatment of samples and identification of their color is made. The dependence of RGB parameters from time and intensity of heat treatment is studied. Empirical relations to determine the identifying characteristics of color, as a function of the degree of completion of stages of thermal destruction, in RGB and LAB systems are obtained in explicit form.

**Keywords:** wood, thermal modification, identification of color, color characteristics, kinetic parameters.

Для улучшения свойств древесины широко используется ее термическая обработка, одним из видов которой является термическое модифицирование. Термомодифицирование – это нагрев древесины без доступа кислорода, сопровождающийся ее термической деструкцией. Термически модифицированная древесина может использоваться в качестве конструкционных и отделочных материалов. Это ставит задачу определения ее теплофизических, физико-химических, биологических и декоративных свойств, а также их изменения при термической обработке.

Одним из важных параметров термически модифицированной древесины является ее цвет. Он определяет декоративные свойства древесины. При термическом модифицировании цвет древесины может меняться, причем изменение цвета происходит по всему объему материала. Это в ряде случаев позволяет отказаться от покраски изделий из древесины и покрытия их защитными составами [1, 6].

Для идентификации цвета поверхности разработаны соответствующие атласы цветов. Наиболее известные – цветовой атлас ВНИИМ, атлас цветов Манселла, атлас цветов Pantone, атлас цветов Рабкина, атлас цветов ICI и другие. Из атласа выбирают цвет, наиболее соответствующий цвету поверхности, и определяются длина волны  $\lambda$ , чистота  $P$  и коэффициент отражения  $\rho$ . Однако такой подход включает элементы субъективизма и недо-

бен для цифровой обработки информации. Это связано с тем, что древесина имеет ярко выраженную текстуру и рисунок, то есть параметры, характеризующие цвет поверхности в какой-либо точке, являются функциями координат этой точки.

Для идентификации цветов, их цифровой обработки и воспроизведения в компьютерной и телевизионной технике, полиграфии и в других областях техники были разработаны соответствующие цветовые модели или цветовые пространства. Среди наиболее известных – цветовые модели RGB, CMYK, XYZ, LAB и другие. Поскольку идентификация и обработка цветовых характеристик поверхности древесины может проводиться с использованием фото- и компьютерной техники, были выбраны цветовые модели RGB и LAB. Первая модель была разработана специально для обработки и воспроизведения цветов в компьютерной и телевизионной технике. RGB модель является дискретной. Максимальное количество задаваемых в ней цветов равно  $256^3 = 16777216$ . Не все различаемые глазом человека цвета могут быть идентифицированы в этой модели, однако поставленной задаче она отвечает в полной мере. При необходимости параметры модели RGB могут быть переведены в параметры других моделей с помощью существующих алгоритмов и программ. RGB модель является аддитивной, то есть в ней цвета задаются добавлением к черному красной (Red), зеленой

(Green) и синей (Blue) компонент различной интенсивности.

Термодеструкция является сложным многостадийным физико-химическим процессом. Термическое разложение материала вызывает изменение его состава, структуры, что сопровождается изменением его свойств [7, 8, 9, 10]. Древесину можно рассматривать как многокомпонентный композиционный материал, состоящий из гемицеллюлозы, целлюлозы, лигнина и др. компонентов. Каждый из компонентов разлагается в своем диапазоне температур, что обуславливает многостадийность процесса термической деструкции. Степень термической деструкции материала определяется кинетикой протекания каждой стадии и степенью ее завершенности.

При термической деструкции древесины меняется ее состав, что приводит к изменению цвета материала. Состав может быть описан как функция масс стадий термической деструкции компонентов  $\omega_i$ , составляющих данный композиционный материал [2,3,4,5]:

$$\omega(T, \tau) = \sum_{\gamma} \omega_{0,\gamma} \cdot \exp \left[ -A_{\gamma} \int_0^{\tau} \exp \left( -\frac{E_{\gamma}}{R \cdot T} \right) d\tau \right]. \quad (1)$$

Каждую из составляющих цвета можно представить как функцию  $\omega_i$ :

$$\begin{aligned} R &= f_R(\omega_i) \\ G &= f_G(\omega_i) \\ B &= f_B(\omega_i) \end{aligned} \quad (2)$$

В этом случае (2) можно записать в виде

$$\text{цвет} = f(R(\omega_i), G(\omega_i), B(\omega_i)).$$

Для определения функций  $f_R$ ,  $f_G$  и  $f_B$  в явном виде предположим, что зависимость величин  $R$ ,  $G$  и  $B$ , составляющих цвет, от масс стадий термической деструкции компонентов древесины описывается степенным многочленом

$$R(\omega) = a_R + \sum_{i=1}^n b_{R,i} \cdot \omega_i + \sum_{i=1}^n c_{R,i} \cdot \omega_i^2 + \sum_{i=1}^n d_{R,i} \cdot \omega_i^3 + \dots \quad (3)$$

$$G(\omega) = a_G + \sum_{i=1}^n b_{G,i} \cdot \omega_i + \sum_{i=1}^n c_{G,i} \cdot \omega_i^2 + \sum_{i=1}^n d_{G,i} \cdot \omega_i^3 + \dots \quad (4)$$

$$B(\omega) = a_B + \sum_{i=1}^n b_{B,i} \cdot \omega_i + \sum_{i=1}^n c_{B,i} \cdot \omega_i^2 + \sum_{i=1}^n d_{B,i} \cdot \omega_i^3 + \dots \quad (5)$$

Здесь  $a, b, c, d$  – коэффициенты регрессии,  $n$  – число стадий термической деструкции материала.

Коэффициенты регрессии определяются из обработки результатов соответствующих экспериментов.

Были проведены экспериментальные исследования зависимости цвета термически модифицированной древесины от степени термодеструкции. Экспериментальное определение цветовых характеристик поверхностей проводилось на образцах, прошедших термическую обработку. Нагрев проводился до определенной степени завершенности каждой из стадий, начиная с первой. Термическая обработка осуществлялась в вакууме. Относительные массы образцов после термического модифицирования приведены в табл. 1. Результаты определения цветовых характеристик образцов с использованием спектроденситометра Spectrodensitometer 500 Series фирмы X-Rite приведены в табл. 2.

Анализ результатов экспериментальной идентификации цветовых характеристик образцов древесины, подвергшейся термическому воздействию, показывает, что зависимость характеристик  $R$ ,  $G$  и  $B$  от степени завершенности отдельных стадий термической деструкции может быть описана полиномом второй степени

$$R(\omega)_j = a_R + \sum_{i=1}^n b_{R,i} \cdot \omega_{j,i} + \sum_{i=1}^n c_{R,i} \cdot \omega_{j,i}^2, \quad (6)$$

$$G(\omega)_j = a_G + \sum_{i=1}^n b_{G,i} \cdot \omega_{j,i} + \sum_{i=1}^n c_{G,i} \cdot \omega_{j,i}^2, \quad (7)$$

$$B(\omega)_j = a_B + \sum_{i=1}^n b_{B,i} \cdot \omega_{j,i} + \sum_{i=1}^n c_{B,i} \cdot \omega_{j,i}^2. \quad (8)$$

Здесь  $j$  – номер экспериментальной точки. После подстановки экспериментальных значений в выражение (6) получаем систему уравнений. Решая полученную систему, определяем коэффициенты,  $a_R, b_{R,i}, c_{R,i}$  для аппроксимации параметра  $R$ . Аналогичным образом могут быть определены коэффициенты для аппроксимации параметров  $G$  и  $B$ . В результате были рассчитаны уравнения, описы-

вающие зависимости параметров  $R$ ,  $G$  и  $B$  от относительных масс первых трех стадий термической деструкции древесины березы:

$$R(\omega) = 226 - 11857(\omega_{0,1} - \omega_1) + 16095(\omega_{0,2} - \omega_2) - \quad (9)$$

$$- 188065(\omega_{0,2} - \omega_2)^2 + 32652(\omega_{0,3} - \omega_3),$$

$$G(\omega) = 217 - 12893(\omega_{0,1} - \omega_1) + 16743(\omega_{0,2} - \omega_2) - \quad (10)$$

$$- 488065(\omega_{0,2} - \omega_2)^2 + 32652(\omega_{0,3} - \omega_3),$$

$$B(\omega) = 205 - 13771(\omega_{0,1} - \omega_1) + 17518(\omega_{0,2} - \omega_2) - \quad (11)$$

$$- 488065(\omega_{0,2} - \omega_2)^2 + 31967(\omega_{0,3} - \omega_3)$$

Здесь  $\omega_{0,i}$  – начальная относительная масса  $i$ -й стадии.

На рис. 1 приведен график изменения параметра цвета  $R$  в зависимости от относительной массы образца. На графике сплошная линия – расчет по соотношению (9), точки – экспериментальные значения.

На рис. 2, 3 построены графики зависимости параметров цвета  $G$  и  $B$  соответственно от степени термической деструкции древесины березы, сплошная линия – расчетные значения (соотношения (10) и (11)), точки – экспериментальные данные.

Были получены зависимости от степени термической деструкции древесины березы коэффициентов для идентификации цвета в системе LAB:

$$L(\omega) = 87 - 5429(\omega_{0,1} - \omega_1) + 1900(\omega_{0,2} - \omega_2) - \quad (12)$$

$$- 22051(\omega_{0,2} - \omega_2)^2 + 31957(\omega_{0,3} - \omega_3),$$

$$a(\omega) = 2 + 1143(\omega_{0,1} - \omega_1) - 13533(\omega_{0,2} - \omega_2) + \quad (13)$$

$$+ 51614(\omega_{0,2} - \omega_2)^2 + 31967(\omega_{0,3} - \omega_3),$$

$$b(\omega) = 7 + 2714(\omega_{0,1} - \omega_1) - 17931(\omega_{0,2} - \omega_2) + \quad (14)$$

$$+ 12226(\omega_{0,2} - \omega_2)^2 + 31967(\omega_{0,3} - \omega_3).$$

На рис. 4-6 приведены графики зависимостей коэффициентов  $L$ ,  $a$  и  $b$  от относительной массы образцов. Сплошные линии – расчеты по соотношениям (12)-(14), точки – экспериментальные значения. Для проверки адекватности предложенной модели была проведена ее экспериментальная проверка. Образец древесины березы подвергся термическому модифицированию в вакууме.

Таблица 1

Степень разложения образцов древесины

№ п/п	Относительная масса стадии при термическом разложении					
	$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_4$	$w_5$	$w_{\text{общ}}$
Натуральная древесина	0,026	0,119	0,571	0,134	0,151	1,000
№1	0,024	0,119	0,571	0,134	0,151	0,999
№2	0,023	0,119	0,571	0,134	0,151	0,998
№3	0,019	0,119	0,571	0,133	0,151	0,993
№4	0	0,11	0,568	0,132	0,151	0,961
№5	0	0,07	0,555	0,130	0,151	0,906

Таблица 2

Результаты определения цветовых характеристик

№ п/п	Цветовые характеристики								
	$R$	$G$	$B$	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\lambda$ , нм	$\rho$ , %	$P$ , %
Натуральная древесина	224	200	165	82	5	21	577	86	10
№1	175	130	84	58	14	32	583,5	29	46
№2	173	123	75	56	16	34	583,5	29	46
№3	133	88	50	45	16	30	582,3	21	40
№4	75	45	21	22	12	21	591	15,5	21
№5	62	38	18	18	10	18	590	9	19

Цветовые характеристики древесины определялись экспериментально и рассчитывались по соотношениям (9)-(11). Результаты проверки приведены в табл. 3. Проведенная проверка показала, что предложенная модель удовлетворительно описывает изменение цвета древесины березы при термообработке.

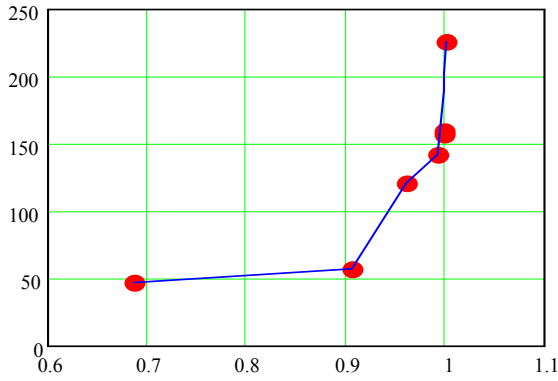


Рис. 1. График зависимости параметра идентификации цвета  $R$  от относительной массы образца из древесины березы

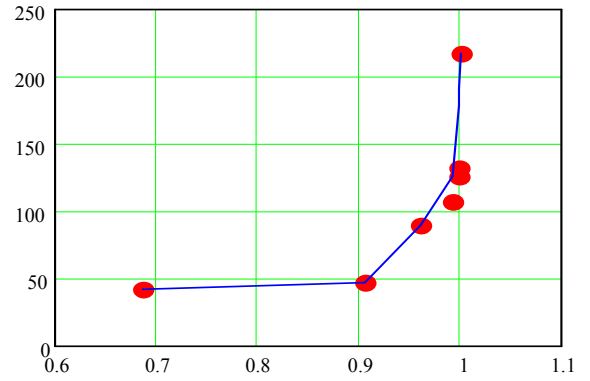


Рис. 2. График зависимости параметра идентификации цвета  $G$  от относительной массы образца из древесины березы

Таблица 3

Цветовые характеристики образцов термодревесины.

Номер стадии	Относительная масса образца		Относительная масса стадий	Относительная погрешность расчета конечной массы образца, %	Цветовые характеристики образца, R/G/B	
	начальная	конечная			расчет	эксперимент
1	1	0,844	0	7	95/65/43	89/61/40
2			0,017			
3			0,545			
4			0,122			
5			0,160			

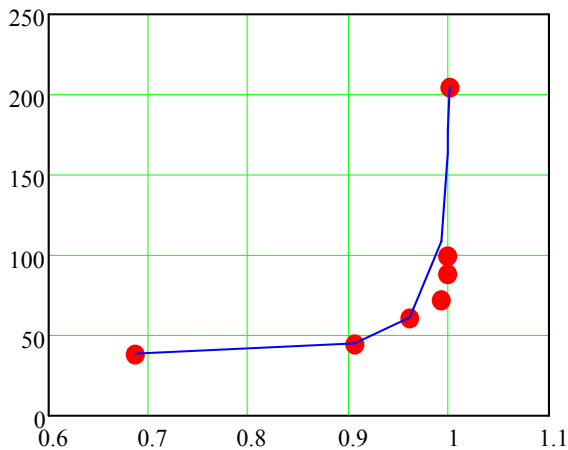


Рис. 3. График зависимости параметра идентификации цвета  $B$  от относительной массы образца из древесины березы

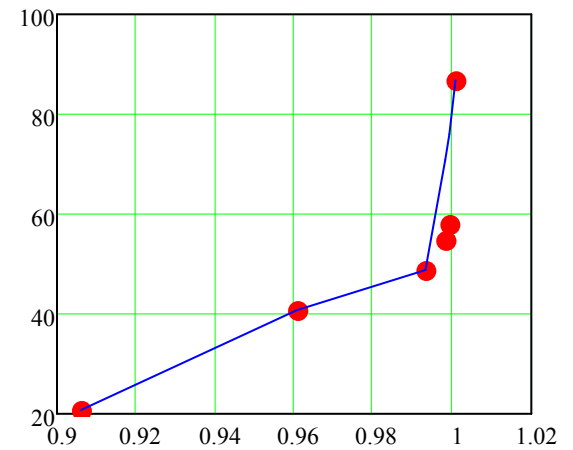


Рис. 4. График зависимости параметра идентификации цвета  $L$  от относительной массы образца из древесины березы

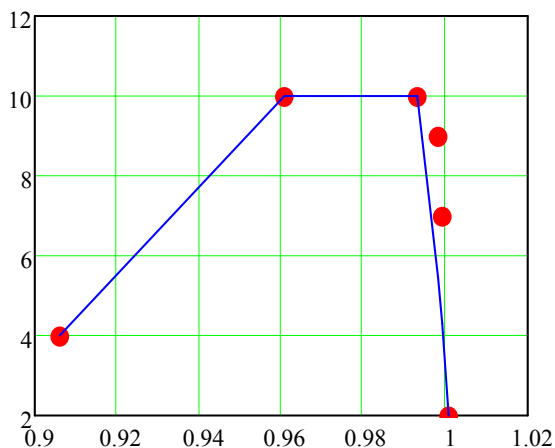


Рис. 5. График зависимости параметра идентификации цвета  $a$  от относительной массы образца из древесины березы

При известных температурном режиме и времени термической обработки может быть рассчитана степень завершенности отдельных стадий деструкции древесины (1). Кинетические параметры, входящие в уравнение (1), приведены в [1, 4]. Полученные зависимости (9)-(11) и (12)-(14) позво-

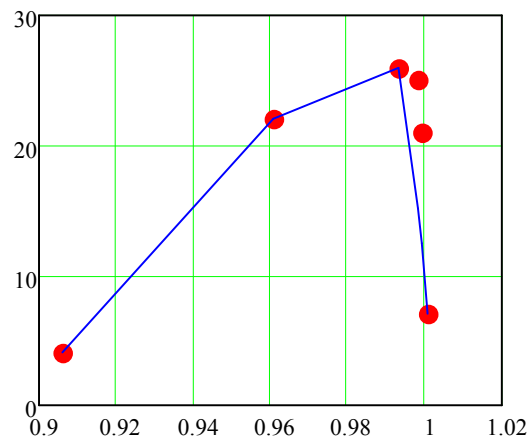


Рис. 6. График зависимости параметра идентификации цвета  $b$  от относительной массы образца из древесины березы

ляют рассчитать параметры цвета в системах RGB и LAB соответственно, с учетом степени термической деструкции древесины. Таким образом, предложенная модель позволяет спрогнозировать цвет древесины березы, термически модифицированной при различных режимах.

### Библиографический список

1. Ермоченков, М. Г. Прогнозирование свойств термически модифицированной древесины /М.Г. Ермоченков // Вестник МГУЛ - Лесной вестник. – М.: МГУЛ, 2010. № 4 (73). – С. 111–115. (10)
2. Жигунов, С.В. Тепломассообмен и кинетика термодеструкции при высокотемпературном нагреве композиционных материалов: дис... канд. техн. наук 05.14.05. /С.В. Жигунов. – М.: МГУЛ, 1990. – 184 с. (6)
3. Кислицын, А.Н. Пиролиз древесины: химизм, кинетика, продукты, новые процессы. – М.: Лесная промышленность, 1990. – 312 с. (8)
4. Кувик, Т. Е. Кинетика термической деструкции древесины в приложении к прогнозированию свойств термомодифицированной древесины/ Т.Е. Кувик // Четвертая Международная научно-практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ». – М.: МГАУ, 2011. Т. 2. – С. 144 – 148. (9)
5. Шведов, Б. А. Энерго- и массообмен в материалах тепловой защиты многоразовых ракетно-космических систем: дисс. ... докт. техн. наук / Б.А. Шведов. – М.: МЛТИ, 1990. – 542 с. (2)
6. Bekhta P, Niemz P (2003): Effect of high temperature on the changes in colour, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. *Holzforsch*, 57, (5), s. 539-546.
7. Calonego WF, Durgante Severe ET, Furtado EL (2010) Decay resistance of thermally-modified *Eucalyptus grandis* wood at 140°C, 160°C, 180°C, 200°C and 220°C. *Bioresour Technol* 101:9391-9394
8. Esteves B, Pereira H (2009) Wood modification by heat treatment: a review. *Bioresources* 4(1):370-404
9. Slopiecka, Katarzyna; Bartocci, Pietro; Fantozzi, Francesco. Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis / 3rd International Conference on Applied Energy (ICAE) Perugia, ITALY, 2011. - APPLIED ENERGY, 2012. – Vol. 97. – Is. - Pp. 491-497.

10. Grieco, Enrico; Baldi, Giancarlo. Analysis and modelling of wood pyrolysis / CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE, 2011. – Vol. 66. - Is. 4. - Pp. 650-660.

### References

1. Ermochenkov M. G. *Prognozirovanie svoystv termicheski modifitsirovannoy drevesiny* [Predicting the properties of thermally modified wood]. Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoi Vestnik, 2010, № 4 (73), pp.111-115.
2. Zhigunov S.V. *Teplomassoobmen i kinetika termodestruktsyi pri vysokotemperaturnom nagreve kompozitsionnykh materialov* [Heat and mass transfer and kinetics of thermal degradation at high temperature composite materials] diss. ... kand. tekhn. nauk [dis. ... Cand. tehn. sciences]. Moscow, 1990.
3. Kislitsin A.N. *Piroliz drevesiny: himizm, kinetika, produkty, novye protsessy* [Pyrolysis of Wood: chemistry, kinetics, products, new processes]. Moscow: Lesnaya promyshlennost [Forest Industry], 1990, 312 p.
4. Kuvik T.E. *Kinetika termicheskoy destruktsyi drevesiny v prilozhenii k prognozirovaniyu svoystv termomodifitsirovannoy drevesiny* [Kinetics of thermal degradation of wood in the annex to predict the properties of wood thermomodified]. 4 *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Sovremennye energosberegayushye teplovytehnologii (sushka u termovlazhnostnaya obrabotka materialov) SETT"* [The Fourth International scientific-practical conference "Modern energy-saving heat technology (drying and hydrothermal treatment of materials) SETT"]. Moscow, 2011. T.2, pp. 144-148.
5. Shvedov B.A. *Energo- i massoobmen v materialah teplovoiy zashity mnogorazovykh raketno-kosmicheskikh sistem*: [Energy and mass transfer in thermal protection materials reusable space-rocket systems]: diss. ... doct. Tekhn. Nauk [diss. ... Doctor. tehn. sciences]. Moscow, 1990.
6. Bekhta P, Niemz P (2003): Effect of high temperature on the changes in colour, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. *Holzforsch*, 57, (5), s. 539-546.
7. Calonego WF, Durgante Severe ET, Furtado EL (2010) Decay resistance of thermally-modified Eucalyptus grandis wood at 140°C, 160°C, 180°C, 200°C and 220°C. *Bioresour Technol* 101:9391-9394
8. Esteves B, Pereira H (2009) Wood modification by heat treatment: a review. *Bioresources* 4(1):370-404
9. Slopiecka, Katarzyna; Bartocci, Pietro; Fantozzi, Francesco. Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis / 3rd International Conference on Applied Energy (ICAE) Perugia, ITALY, 2011. - APPLIED ENERGY, 2012. – Vol. 97. – Is. - Pp. 491-497.
10. Grieco, Enrico; Baldi, Giancarlo. Analysis and modelling of wood pyrolysis / CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE, 2011. – Vol. 66. - Is. 4. - Pp. 650-660.

### Сведения об авторах

*Ермоchenков Михаил Геннадьевич*, доцент кафедры теплофизики Э-6 Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (МФ), кандидат технических наук, г. Мытищи, Россия, e-mail: ermochenkov@mgul.ac.ru

*Хроменко Андрей Владимирович*, доцент кафедры теплофизики Э-6 Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (МФ), кандидат технических наук, г. Мытищи, Россия, e-mail: hromenko@mgul.ac.ru

### Information about authors

*Ermochenkov Mikhail Gennadyevich*, Associate Professor of the Department of Thermophysics E-6 Moscow State Technical University. N.E. Bauman (MF), Candidate of Technical Sciences, Mytitschi, Russia, e-mail: ermochenkov@mgul.ac.ru

*Hromenko Andrey Vladimirovich*, Associate Professor of the Department of Thermophysics E-6 Moscow State Technical University. N.E. Bauman (MF), Candidate of Technical Sciences, Mytitschi, Russia. e-mail: hromenko@mgul.ac.ru