

Ганиева Эльвира Назиповна – аспирант кафедры технологии машиностроения Мытищинского филиала ФГБОУ ВО «Московского государственного технического университета имени Н.Э.Баумана», г. Мытищи, Российская Федерация; e-mail: ganieva@mgul.ac.ru

Information about authors

Abrazumov Vladimir Vladimirovich – Professor in «Technology of machine building» Mytishchi Branch of Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University», DSc in Engineering, Associate Professor, Mytishchi, Russian Federation; e-mail: abrazumov@mgul.ac.ru

Kotenko Vladimir Dmitrievich – Professor in «Technology of machine building» Mytishchi Branch of Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University», DSc in Engineering, Professor, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Academician of the Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, Laureate of State prize, Honoured master of sciences and engineering, Mytishchi, Russian Federation; e-mail: kotenko@mgul.ac.ru

Ganieva Elvira Nazipovna – post-graduate student «Technology of machine building» Mytishchi Branch of Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University», Mytishchi, Russian Federation; e-mail: ganieva@mgul.ac.ru

DOI:

УДК 674.047

КИНЕТИКА СУШКИ И УВЛАЖНЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

кандидат технических наук, доцент **М. Г. Ермоченков**

Мытищинский филиал «Московского государственного технического университета имени Н.Э.Баумана», г. Мытищи, Российская Федерация

Термическое модифицирование древесины широко используется для улучшения ее свойств. Нагрев без доступа окислителя приводит к деструкции материала, которая вызывает изменение состава и структуры и как следствие свойств. Одним из этапов процесса термомодифицирования является сушка. В статье приведены результаты экспериментально-расчетных исследований кинетики сушки различных пород древесины в гелиевой среде. Древесина рассматривается как многокомпонентный композиционный материал, одним из компонентов которого является свободная и связанная влага. Сушка – это сложный многостадийный физико-химический процесс. Рассматривается модель, описывающая удаление связанной влаги, как совокупность прямого (десорбция) и обратного (сорбция) процессов. Предложен экспериментально-расчетный метод определения кинетических параметров сорбции. Они определяются из условия равенства скоростей сорбции и десорбции при равновесной влажности древесины. Сделано допущение, что скорость прямого процесса равна скорости удаления связанной влаги из стружки древесины в осушенном воздухе. Кинетические параметры десорбции определяются по результатам термогравиметрических экспериментов. Для проведения термогравиметрических исследований была разработана и изготовлена экспериментальная установка, позволяющая проводить исследования в среде с контролируемой влажностью. В качестве образцов использовалась стружка древесины различных пород. Нагрев осуществлялся с постоянным темпом 1 К/мин . Проведены термогравиметрические исследования кинетики сушки древесины березы в осушенном воздухе. Получены постадийные кинетические параметры прямого процесса. Исходя из полученных результатов, были рассчитаны кинетические параметры отдельных стадий сорбции влаги древесиной березы. Эти данные позволяют рассчитывать изменение влажности древесных материалов при удалении связанной влаги в средах с произвольной влажностью. Проведена экспериментальная проверка адекватности предложенной модели.

Ключевые слова: прямые и обратные реакции, кинетические параметры сушки, кинетические параметры увлажнения, удаление связанной влаги, сушка древесины.

KINETICS OF DRYING AND MOISTERING OF WOOD

PhD in Engineering, Associate Professor **M. G. Ermochenkov**

Mytishchi Branch of Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University», Mytishchi, Russian Federation

Abstract

Thermal modification of wood is widely used to improve the properties thereof. Heating without access of oxidant leads to degradation of the material, which causes a change in composition and structure and properties as a consequence. One of the stages of the thermal modification process is drying. The article presents the results of experimental and computational studies of the kinetics of drying of different types of wood in a helium environment. Wood is considered as a multi-component composite, one component of which is free and bound moisture. Drying - complex multistep physical and chemical process. A model describing the removal of bound moisture, as a set of direct (desorption) and reverse (sorption) processes is described. The experimental-computational method for determining the kinetic parameters of sorption is suggested. They are determined from the condition that the rate of sorption and desorption is equal with equilibrium moisture content of wood. We have made the assumption that the speed of the direct process is related to the rate of removal of moisture from the wood shavings in dry air. Desorption kinetic parameters are determined by the results of thermogravimetric experiments. Experimental setup was designed and constructed for the thermogravimetric study that allows you to conduct research in an environment with controlled humidity. Wood shavings of various breeds were taken as samples. Heating is carried out at a constant rate of 1 K / min. Thermogravimetric studies of the kinetics of birch wood drying in dry air were conducted. Stepwise kinetic parameters of the direct process are obtained. Based on the obtained results, kinetic parameters of the individual stages of moisture sorption birch wood were calculated. These data allow us to calculate the change in the humidity of wood materials by removing the bound moisture in arbitrary humidity environments. The experimental verification of the adequacy of the proposed model is made.

Keywords: forward and backward reaction, kinetic drying parameters, kinetic parameters of moisturing, removal of bound moisture, wood drying.

Сушка и термическое модифицирование древесины – виды термической обработки, применяемые для улучшения свойств древесины. Технологический процесс термического модифицирования древесины включает в себя несколько этапов: прогрев, сушку, термическую деструкцию и кондиционирование.

Исследованию кинетики сушки и пиролиза древесины посвящены работы [8, 9, 11, 13]. Предложен ряд математических моделей, для описания каждого из этих процессов [10, 12].

Для математического описания процессов, протекающих в древесине при термическом модифицировании на всех этапах, была разработана модель [1, 2]. Она описывает тепло- и массообмен с внутренними источниками в древесине при нагреве. Одной из задач математической модели является описание внутренних источников теплоты и массы при сушке.

В этой модели древесина рассматривается как трехфазная, открытая термодинамическая сис-

тема. Методами термодинамики можно описать условия равновесия в системе пар-воздух-вода и определить параметры системы. Однако эти методы не позволяют исследовать развитие процесса во времени.

В общем случае можно считать, что в древесине есть свободная и различные виды связанной влаги. Связанной считается вода, вступившая в различные физико-химические связи с веществом древесины. Поскольку связи молекулы воды с древесным веществом различны, разрыв их происходит в разных интервалах температур. Это обуславливает многостадийность процесса удаления связанной влаги. Константу скорости, соответствующую γ -му элементарному процессу, можно описать уравнением Аррениуса [3, 11, 13]:

$$k_{\gamma} = A_{\gamma} \exp\left(-\frac{E_{\gamma}}{RT_{\gamma}}\right) \quad (1)$$

где k_{γ} – константа скорости элементарного γ -го процесса;

A_{γ} – частотный фактор процесса;

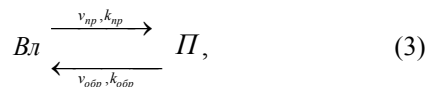
E_{γ} – энергия активации.

Вместе с тем в древесине одновременно с процессами десорбции могут протекать процессы сорбции, то есть поглощения влаги из паровоздушной среды, содержащейся в порах. Скорость процесса сорбции будет определяться концентрацией пара в газовой фазе. Скорость десорбции зависит от концентрации влаги в древесине. При достижении определенных значений концентраций скорости процессов сорбции и десорбции уравниваются, и наступает равновесие. Значение влажности древесины, при котором скорости сушки и увлажнения при заданной относительной влажности газовой фазы ϕ равны, называется равновесным W_p . Равновесная влажность и относительная влажность паровоздушной среды связаны соотношением [4, 5, 6, 7]:

$$W_p = 10,6^{\phi_p} \cdot (3,27 - 0,015 \cdot t_{cm}) \quad (2)$$

где t_{cm} – температура, °C.

Таким образом, можно рассматривать процессы десорбции и сорбции как прямую и обратную химические реакции. Разрыв химических связей молекул воды с древесным веществом в общем виде можно представить как:



где $Вл$ – связанная влага;

$П$ – пар.

Так как в состоянии равновесия скорости реакций дегидратации и гидратации равны, можно записать:

$$\frac{dG_{вл}}{d\tau} = \frac{dG_n}{d\tau}, \quad (4)$$

здесь $G_{вл}$ – масса связанной влаги в единице объема вещества;

G_n – масса пара в единице объема вещества.

Масса пара в единице объема древесины может быть определена из соотношений:

$$G_n = \phi \cdot \frac{P_{нас}}{R_n \cdot T} \cdot П, \quad (5)$$

здесь ϕ – относительная влажность среды в порах древесины,

ρ_n – плотность пара, кг/м³;

p_n – парциальное давление пара во влажном воздухе, Па;

$\rho_{нас}$ – плотность насыщенного пара при температуре влажного воздуха, кг/м³;

$P_{нас}$ – давление насыщенного пара при температуре влажного воздуха, Па;

R – газовая постоянная пара.

Для упрощения задачи можно сделать допущение, что при удалении связанной влаги в осушенном воздухе из стружки древесины, полученной строганием поперек волокон, реакция протекает в кинетической области и скорость обратной реакции (гидратации древесины) стремится к нулю.

Из принятого допущения можно записать:

$$\begin{aligned} \frac{dG_{вл}}{d\tau} &= \frac{d\omega_2}{d\tau} \cdot W_0 \cdot \rho_{сд} = \\ &= W_0 \cdot \rho_{сд} \cdot \sum_{\gamma_2} \omega_{\gamma_2} \cdot A_{\gamma_2} \cdot \exp\left(-\frac{E_{\gamma_2}}{R \cdot T}\right), \end{aligned} \quad (6)$$

где W_0 – начальное влагосодержание древесины;

$\rho_{сд}$ – плотность абсолютно сухой древесины.

То есть, зная кинетические параметры реакции дегидратации древесины в осушенном воздухе (A_{γ_2} , E_{γ_2} и ω_{γ_2}) можно определить скорость изменения влажности древесины, связанную с протеканием прямой реакции.

Так как обмен массой между древесиной и окружающей средой в состоянии равновесия отсутствует, относительная влажность газовой среды в порах древесины равна относительной влажности окружающей среды. В этом случае кинетическое уравнение отдельной стадии процесса можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \left(\frac{d\omega_{\gamma_2}}{d\tau}\right)_{пр} \cdot W_p \cdot \rho_{сд} = \\ = \left(\frac{d\phi_{\gamma_2}}{d\tau}\right)_{обр} \cdot \omega_{0,\gamma_2} \cdot \phi_p \cdot \rho_{нас} \end{aligned} \quad (7)$$

При протекании обратной реакции гидратации древесины пар из паровоздушной смеси в порах древесины вступает в различные химические связи с мате-риалом древесины. Количество пара, вступившего в связь с древесиной в конкретной стадии, определяется безразмерной начальной массой этой стадии.

С учетом уравнений (6) и (7) можно записать:

$$\left(\omega_{\gamma_2} \cdot A_{\gamma_2} \cdot \exp\left(-\frac{E_{\gamma_2}}{R \cdot T}\right) \right)_{np} \cdot \frac{W_p \cdot \rho_{сд}}{\omega_{0,\gamma_2} \cdot \phi_p \cdot \rho_{нас}} =$$

$$= \left(A_{\gamma_2} \right)_{обр} \cdot \exp\left(\frac{-(E_{\gamma_2})_{обр}}{R \cdot T}\right) \quad (8)$$

Прологарифмировав уравнение (8)

$$\ln\left(\left(\omega_{\gamma_2} \cdot A_{\gamma_2} \cdot \exp\left(-\frac{E_{\gamma_2}}{R \cdot T}\right) \right)_{np} \cdot \frac{W_p \cdot \rho_{сд}}{\omega_{0,\gamma_2} \cdot \phi_p \cdot \rho_{нас}}\right) =$$

$$= \ln\left(\left(A_{\gamma_2} \right)_{обр}\right) + \frac{-(E_{\gamma_2})_{обр}}{R \cdot T} \quad (9)$$

и вводя обозначения

$$y = \ln\left(\left(\omega_{\gamma_2} \cdot A_{\gamma_2} \cdot \exp\left(-\frac{E_{\gamma_2}}{R \cdot T}\right) \right)_{np} \cdot \frac{W_p \cdot \rho_{сд}}{\omega_{0,\gamma_2} \cdot \phi_p \cdot \rho_{нас}}\right) \quad (10)$$

$$a = \ln\left(\left(A_{\gamma_2} \right)_{обр}\right) \quad (11)$$

$$b = \frac{-(E_{\gamma_2})_{обр}}{R} \quad (12)$$

$$x = \frac{1}{T} \quad (13)$$

уравнение (8) можно переписать в виде:

$$y = a + b \cdot x \quad (14)$$

Полученное выражение (14) является уравнением прямой. Для определения коэффициентов a и b необходимо иметь не менее двух точек.

Принимая кинетические параметры процесса удаления связанной влаги из стружки древесины в осушенном воздухе за параметры прямого процесса, можно рассчитать величину y для различных равновесных состояний древесины. В результате получим систему уравнений:

$$y_i = a + b \cdot x_i \quad (15)$$

где i – номер точки, $i = 1 \dots n$.

Решая систему уравнений (15) можно определить коэффициенты a и b . Тогда кинетические параметры стадии γ_2 обратной реакции выражаются как:

$$\left(A_{\gamma_2} \right)_{обр} = \exp(a) \quad (16)$$

$$\left(E_{\gamma_2} \right)_{обр} = -b \cdot R \quad (17)$$

Используя соотношения (10) - (17) можно определить частотный фактор и энергию активации для каждой стадии обратного процесса – процесса увлаж-

нения древесины. Для всего процесса, как суммы отдельных стадий, можно записать:

$$W_p \cdot \rho_{сд} \cdot \sum_{\gamma_2} \left(\frac{d\omega_{\gamma_2}}{d\tau} \right)_{np} = \rho_{нас} \cdot \sum_{\gamma_2} \left(\frac{d\phi_{\gamma_2}}{d\tau} \right)_{обр} \quad (18)$$

или

$$W_p \cdot \rho_{сд} \cdot \sum_{\gamma_2} \omega_{0,\gamma_2} \cdot \left(A_{\gamma_2} \right)_{np} \cdot \exp\left(-\frac{(E_{\gamma_2})_{np}}{R \cdot T}\right) =$$

$$= \phi_p \cdot \rho_{нас} \cdot \sum_{\gamma_2} \omega_{0,\gamma_2} \cdot \left(A_{\gamma_2} \right)_{обр} \cdot \exp\left(\frac{-(E_{\gamma_2})_{обр}}{R \cdot T}\right) \quad (19)$$

При выборе точек для расчета кинетических параметров реакции увлажнения древесины, являющейся обратной реакцией процесса сушки, следует учитывать, что и прямой, и обратный процессы многостадийные. Разные стадии имеют максимумы скоростей в разных диапазонах температур, это следует учитывать при выборе точек для определения кинетических параметров конкретных стадий. В качестве кинетических параметров прямой реакции принимаем параметры сушки древесины в воздухе, осушенном в холодильнике с температурой $T = 270,5K$ [1, 3]. Кинетические параметры для каждой стадии данного процесса приведены в табл. На рис. 1 приведены графики изменения масс стадий процесса в зависимости от температур.

Исходя из графиков на рис. 1 выбирались точки для определения кинетических параметров стадий обратного процесса. Для каждой стадии выбирались две точки. После выбора точек для стадии (определения соответствующих температур) кинетические параметры стадии обратного процесса вычислялись из соотношений (10) - (17). Подобные вычисления были выполнены для всех стадий обратного процесса. Результаты вычислений приведены в табл.

Для проверки адекватности предложенной модели процессов проведено сравнение результатов экспериментальных и расчетных исследований. На рис. 2 приведены графики изменения относительной массы образцов из древесины березы при сушке во влажном воздухе.

Сплошная линия соответствует изменению относительной массы образца в термогравиметрическом эксперименте. Исследования проводились в воздухе с начальной относительной влажностью

Результаты исследования кинетики прямой и обратной реакций

Порода древесины, процесс	Номер стадии	Начальная масса стадии, ω_0	Энергия активации, $E/R, K$	Частотный фактор, A, c^{-1}
Береза Прямая реакция – дегидратация	1	0,297	$3,189 \cdot 10^4$	$2,874 \cdot 10^{44}$
	2	0,329	$2,273 \cdot 10^4$	$2,620 \cdot 10^{30}$
	3	0,099	$2,756 \cdot 10^4$	$4,754 \cdot 10^{36}$
	4	0,184	$1,344 \cdot 10^4$	$1,310 \cdot 10^{16}$
	5	0,018	$6,385 \cdot 10^4$	$1,971 \cdot 10^{84}$
	6	0,012	$9,026 \cdot 10^4$	$1,921 \cdot 10^{118}$
	7	0,062	$1,792 \cdot 10^4$	$3,386 \cdot 10^{20}$
Береза Обратная реакция – гидратация	1	0,297	$2,914 \cdot 10^4$	$1,750 \cdot 10^{44}$
	2	0,329	$1,968 \cdot 10^4$	$5,290 \cdot 10^{29}$
	3	0,099	$2,469 \cdot 10^4$	$1,957 \cdot 10^{36}$
	4	0,184	$1,067 \cdot 10^4$	$7,614 \cdot 10^{15}$
	5	0,018	$6,086 \cdot 10^4$	$7,000 \cdot 10^{83}$
	6	0,012	$8,768 \cdot 10^4$	$1,691 \cdot 10^{118}$
	7	0,062	$1,593 \cdot 10^4$	$1,099 \cdot 10^{21}$

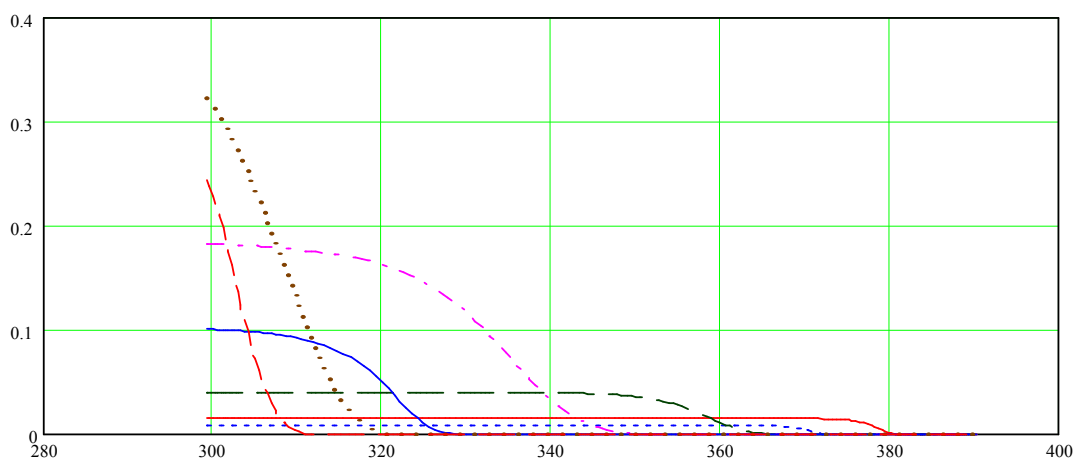


Рис. 1. Графики изменения относительных масс стадий в зависимости от температуры:

— — — первая стадия; — вторая стадия; — — — третья стадия; — — — четвертая стадия;
 — — — пятая стадия; — шестая стадия; — — — седьмая стадия

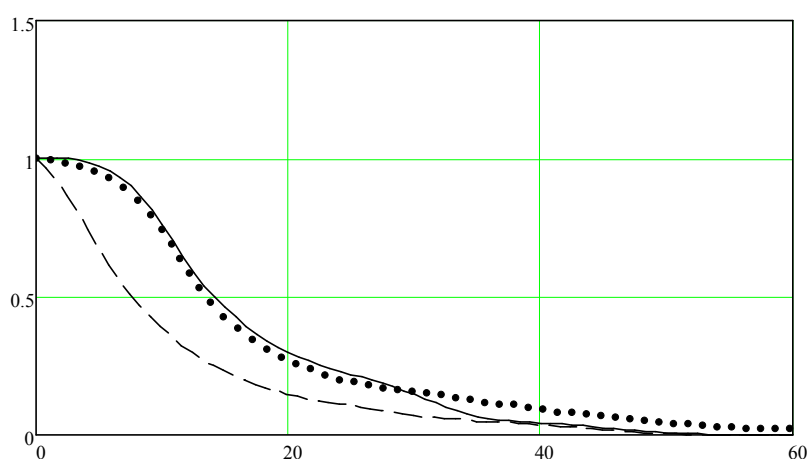


Рис. 2. Графики изменения относительной массы образцов

— — — экспериментальные значения; — — — расчетные значения без учета процесса сорбции;
 — расчетные значения с учетом процесса сорбции

$\varphi=72\%$. Пунктирная линия – значения относительной массы образца, рассчитанные по кинетическим параметрам, полученным при экспериментальных исследованиях процесса сушки в осушенном воздухе. Расчет проводился без учета процесса сорбции древесины.

Точками обозначены расчетные значения,

полученные с учетом процесса увлажнения древесины. Из анализа графиков на рис. 2 следует, что предложенная модель удаления связанной влаги адекватно описывает процессы, протекающие в древесине при сушке. Получены кинетические параметры, описывающие прямые и обратные процессы, протекающие в древесине.

Библиографический список

1. Ермоченков, М.Г. Влияние относительной влажности воздуха в порах древесины на энергию активации парообразования при интенсивном нагреве [Текст] / М.Г. Ермоченков, Ю.П. Семенов, А.Г. Евстигнеев, Т.Е. Кувик // Технология и оборудование для переработки древесины: научные труды. – М.: МГУЛ, 2008. – Вып. 342. – С. 9-13.
2. Ермоченков, М.Г. Математическая модель процессов, протекающих в древесине при интенсивной сушке. Строение, свойства и качество древесины [Текст] / М.Г. Ермоченков, Ю.П. Семенов; Труды IV Международного симпозиума. – СПб.: СПбТЛТА, 2004. – С. 530-533.
3. Ермоченков, М.Г. Определение внутренних источников при сушке древесины с применением термogravиметрического анализа методами химической кинетики [Текст] / М.Г. Ермоченков // Дендрология и лесоведение. Материалы Всероссийской конференции, посвященной 50-летию Сибирского отделения РАН. – Красноярск, 2007. – С. 129-132.
4. Серговский, П.С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины [Текст] / П.С. Серговский. – М.: Лесн. промышленность, 1975. – 400 с.
5. Уголев, Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения [Текст]: учебник для сред. проф. образования / Б.Н. Уголев. – М.: Изд. центр «Академия», 2006. – 272 с.
6. Чудинов, Б.С. Вода в древесине [Текст] / Б. С. Чудинов. – Новосибирск: Наука, 1984. – 267 с.
7. Шубин, Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины [Текст] / Г.С. Шубин. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 336 с.
8. Peters, B. Drying and pyrolysis of wood particles: experiments and simulation [Text] / B. Peters // Journal of analytical and applied pyrolysis. – 2003. – Vol. 70. – Is. 2. – pp. 233-250.
9. Saastamoinen, J; Richard, JR. Simultaneous drying and pyrolysis of solid fuel particles. [Text] / J. Saastamoinen, JR. Richard // Combustion and flame. – 1996. – Vol. 106. – Is. 3. – pp. 288-300.
10. Xu, Qixiang Mathematical Modeling of Rotary Drying of Woody Biomass [Text] / Xu, Qixiang; Pang, Shusheng. / 3rd World Forum on Crystallization, Filtration and Drying: Mumbai, // India. Drying technology. – 2008. – Vol. 26. – Is. 11. – pp. 1344-1350.
11. Chen, Dengyu In-depth investigation on the pyrolysis kinetics of raw biomass. Part I: Kinetic analysis for the drying and devolatilization stages. [Text] / Chen, Dengyu; Zheng, Yan; Zhu, Xifeng // Bioresource technology, 2013. – Vol. 131. – pp. 40-46.
12. Fyhr, C; Rasmuson, A. Mathematical model of steam drying of wood chips and other hygroscopic porous media. [Text] / C. Fyhr, A. Rasmuson // Aiche journal. – 1996. – Vol. 42. – Is. 9. – pp. 2491-2502.
13. Collignan, A. Description and analysis of timber drying kinetics [Text] / A. Collignan, JP. Nadeau, JR Puiggali // Drying technology. – 1993. – Vol. 11. – Is. 3. – pp. 489-506.

Reference

- 1 Ermochenkova M.G. *Vliyaniye otnositelnoy vlazhnosti vozduha v porah drevesiny na energiyu aktivatsii parobrazovaniya pri intensivnom nagreve* [Effect of relative humidity in the pores of the wood on the activation energy of vaporization at intensive heating]. *Nauchnye trudy* [Scientific works]. Moscow, 2008, pp. 9-13. (In Russian).
- 2 Ermochenkova M.G. *Matematicheskaya model protsessov, protekayushchih v drevesine pri intensivnoy sushke*.

Stroenye, svoystva i kachestvo drevesiny [A mathematical model of the processes occurring in the wood during intensive drying. The structure, properties and quality of the wood]. *Trudy 4 Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Proceedings of the IV International Symposium]. Saint Petersburg, 2004, pp. 530-533. (In Russian).

3 Ermochenkova M.G. *Opreделение vnutrennih istochnikov pri sushke drevesiny s primeneniem termogravimetricheskogo analiza metodami himicheskoy kinetiki* [Determination of internal sources for drying wood using TGA chemical kinetics methods]. *Dendrologiya i lesovedeniye. Materialy Vserossiyskoy konferentsii, posvyashennoy 50-letiyu Sibirskogo otdeleniya RAN* [Dendrology and Forestry. Proceedings of the conference dedicated to the 50th anniversary of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences]. Krasnoyarsk, 2007, pp. 129-132. (In Russian).

4 Sergovskiy P.S. *Gidrotermicheskaya obrabotka i konservirovanie drevesiny* [Hydrothermal treatment and preservation of wood]. Moscow, 1975, 400 p. (In Russian).

5 Ugolev B.N. *Drevesinovedenie s osnovami lesnogo tovarovedeniya* [Wood-the basics of forestry merchandising: the textbook for the media. prof. education]. Moscow, 2006, 272 p. (In Russian).

6 Chudinov B.S. *Voda v drevesine* [The water in the timber]. Novosibirsk, 1984, 267 p. (In Russian).

7 Shubin G.S. *Sushka i teplovaya obrabotka drevesiny* [Drying and heat treatment of wood]. Moscow, 1990, 336 p. (In Russian).

8 Peters B; Bruch, C Drying and pyrolysis of wood particles: experiments and simulation. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 2003, Vol. 70, Is. 2, pp. 233-250.

9 Saastamoinen J, Richard J.R. Simultaneous drying and pyrolysis of solid fuel particles. *Combustion and flame*, 1996, Vol. 106, Is. 3, pp. 288-300.

10 Xu, Qixiang; Pang, Shusheng. Mathematical Modeling of Rotary Drying of Woody Biomass. 3rd World Forum on Crystalization, Filtration and Drying: Mumbai, India. *Drying technology*, 2008, Vol. 26, Is. 11, pp. 1344-1350.

11 Chen, Dengyu; Zheng, Yan; Zhu, Xifeng In-depth investigation on the pyrolysis kinetics of raw biomass. Part I: Kinetic analysis for the drying and devolatilization stages. *Bioresource technology*, 2013, Vol. 131, pp. 40-46.

12 Fyhr, C; Rasmuson, A. Mathematical model of steam drying of wood chips and other hygroscopic porous media. *Aiche journal*, 1996, Vol. 42, Is. 9, pp. 2491-2502.

13 Collignan A., Nadeau J.P., Puiggali J.R. Description and analysis of timber drying kinetics. *Drying technology*, 1993, Vol. 11, Is. 3, pp. 489-506.

Сведения об авторе

Ермоchenков Михаил Геннадьевич – доцент кафедры электротехники, теплотехники и энергоснабжения предприятий лесного комплекса Мытищинский филиал «Московского государственного технического университета имени Н.Э.Баумана», кандидат технических наук, доцент, г. Мытищи, Российской Федерации; e-mail: ermochenkova@mgul.ac.ru

Information about the author

Ermochenkova Mikhail Gennadievich – Associate Professor of electrical engineering, heat engineering and power enterprises of timber industry Mytishchi Branch of Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University», PhD in Engineering, Associate Professor, Mytishchi, Russian Federation; e-mail: ermochenkova@mgul.ac.ru