

УДК 674.047

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.6.114

КИНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ

М.Г. Ермоченков, канд. техн. наук, доц.

Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана (МГУЛ), ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; e-mail: ermochenkov@mgul.ac.ru

Термическая обработка широко применяется для изменения свойств древесины (механических, физико-химических, теплофизических, биологических и др.). Одним из видов термического воздействия является сушка. Для определения оптимальных режимов сушки и минимизации энергетических затрат необходимо разработать математические модели процессов, протекающих в древесине при тепловом воздействии. При математическом описании тепломассообмена при сушке стоит задача описания внутренних источников теплоты и массы. Удаление влаги рассматривается как сложный многостадийный физико-химический процесс. Стадийность процесса сушки обусловлена наличием в древесине влаги, имеющей связи с древесным веществом. Разрушение связей происходит в своих (разных) диапазонах температур. Отдельные стадии рассматриваются как параллельные, независимые химические реакции и описываются кинетическими уравнениями. Для исследования кинетики удаления связанной влаги в древесине была разработана и изготовлена экспериментальная установка, позволяющая проводить термогравиметрические эксперименты в среде с контролируемой влажностью. Образцы для исследования имели разную начальную влажность при различной относительной влажности среды. Результаты термогравиметрических экспериментов обрабатывали с использованием метода, позволяющего разделить процесс на отдельные стадии. Установлено, что удаление связанной влаги из древесины протекает в семь стадий. Для каждой стадии были определены энергия активации, предэкспоненциальный множитель и начальная относительная масса. Изучена зависимость кинетических параметров от относительной влажности среды. Сделано допущение, что только энергия активации зависит от влажности сушильного агента. Получены эмпирические зависимости энергии активации от относительной влажности среды для первой, второй и третьей стадий; проведены термогравиметрические исследования кинетики сушки древесины с начальной влажностью, превышающей предел насыщения клеточных стенок, т. е. при наличии свободной влаги; получены постадийные кинетические параметры.

Ключевые слова: сушка древесины, кинетика сушки, термогравиметрические исследования, кинетические параметры, относительная влажность среды.

Для цитирования: Ермоченков М.Г. Кинетические параметры процесса сушки древесины // Лесн. журн. 2017. № 6. С. 114–125. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.6.114

Введение

Древесина широко применяется в качестве конструкционных, строительных и отделочных материалов. Она относится к возобновляемым и легко доступным источникам сырья и обладает рядом ценных свойств, обеспечивающих ее использование в различных областях деятельности человека. К таким свойствам можно отнести экологическую чистоту, достаточно высокую механическую прочность, химическую стойкость при нормальных условиях, превосходные декоративные характеристики и т. д.

Для изменения физико-химических, механических, теплотехнических, биологических, декоративных и других свойств широко используются технологические процессы, предполагающие термическое воздействие на древесину. К ним можно отнести сушку древесины и различные виды ее модифицирования, в том числе и термическое, которому может подвергаться как предварительно высушенная древесина, так и влажная. В последнем случае технологический процесс состоит из двух этапов – интенсивной сушки и модифицирования.

При сушке из материала удаляются различные виды свободной и связанной влаги. В общем случае испарение влаги происходит и на поверхности материала, и внутри его. Процесс испарения сопровождается интенсивными тепловыми эффектами. Наличие источников теплоты и массы внутри материала и на поверхности приводит к возникновению в нем градиентов температуры, давления и концентраций.

Объекты и методы исследования

Для математического описания процессов, протекающих в древесине на этапах сушки и модифицирования, нами была разработана математическая модель [2], описывающая тепло- и массообмен в древесине при нагреве. Соответствующие дифференциальные уравнения содержат члены, характеризующие внутренние источники теплоты и массы.

Испарение влаги – сложный многостадийный физико-химический процесс. Стадийность объясняется наличием в древесине воды с разными формами связи с древесинным веществом. Стадии можно рассматривать как параллельные, независимые химические реакции. Скорости протекания каждой стадии и многостадийного процесса описываются следующими уравнениями [2, 3, 6]:

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \omega A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right); \quad (1)$$

$$\frac{d\omega_j}{d\tau} = \sum_{j=1}^m \omega_j A_j \exp\left(-\frac{E_j}{RT}\right), \quad (2)$$

где ω – безразмерная масса на стадии;

τ – время, с;

A – частотный фактор, с⁻¹;

E – энергия активации, Дж/моль;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);
 T – температура, К;
 j – индекс, соответствующий номеру стадии;
 m – число стадий.

В случае моделирования процесса испарения влаги в древесине

$$\omega = \frac{W_i - W_k}{W_0 - W_k}, \quad (3)$$

где W_i , W_k , W_0 – соответственно текущая, конечная и начальная влажность древесины, %.

Таким образом, стоит задача определения кинетических параметров удаления связанной влаги и их зависимости от параметров среды.

Анализ влияния параметров среды на изменение кинетических параметров [4, 5, 7–11] позволяет для упрощения задачи сделать допущение, что только энергия активации процесса испарения связанной влаги является функцией относительной влажности воздуха, частотный фактор при этом остается константой. В этом случае уравнение (2) примет следующий вид:

$$\frac{d\omega_j}{d\tau} = \sum_{j=1}^m \omega_j A_j \exp\left(-\frac{E(\varphi)_j}{RT}\right). \quad (4)$$

Здесь φ – относительная влажность воздуха, %.

Для определения функциональной зависимости $E(\varphi)_j$ будем исходить из того, что при $\varphi = \text{const}$ энергия активации является величиной постоянной. Таким образом, задавая значения влажности воздуха и проводя при этих значениях термогравиметрические исследования процесса удаления связанной влаги, можно найти соответствующие данному уровню относительной влажности кинетические параметры, в том числе энергию активации.

Нами разработана и изготовлена экспериментальная установка для проведения термогравиметрических исследований процессов испарения влаги в древесине, которая позволила изучить кинетику сушки древесины в среде с контролируемой влажностью (рис. 1).

Установка состоит из теплоизолированной, термостатированной камеры, в стенки которой вмонтирован электрический нагреватель. Камера имеет форму цилиндра диаметром 0,22 м и высотой 0,30 м. Теплоизоляция камеры выполнена из гофрированного картона, пенополиуретана и алюминиевой фольги. Материалы для изготовления и теплоизоляции камеры выбирались из условия обеспечения минимальной теплоемкости. В камеру подается воздух, подогретый в нагревателе-печи (4). Подача в установку подогретого воздуха и наличие нагревателя в стенках камеры (8), исключающего потери теплоты в окружающую среду, позволяют минимизировать градиенты температур в объеме камеры.

Согласованная работа нагревателей камеры и подогревателя воздуха обеспечивается электронной системой управления (3) на базе двух прецизионных регуляторов температуры РИФ-101 (2). Система управления позволяет задавать и поддерживать темп нагрева в диапазоне от 0,1 до 7,0 °С/мин, а также сохранять нулевую разность температур подаваемого в камеру воздуха и стенок камеры. Соответствующие температуры контролируются с помощью

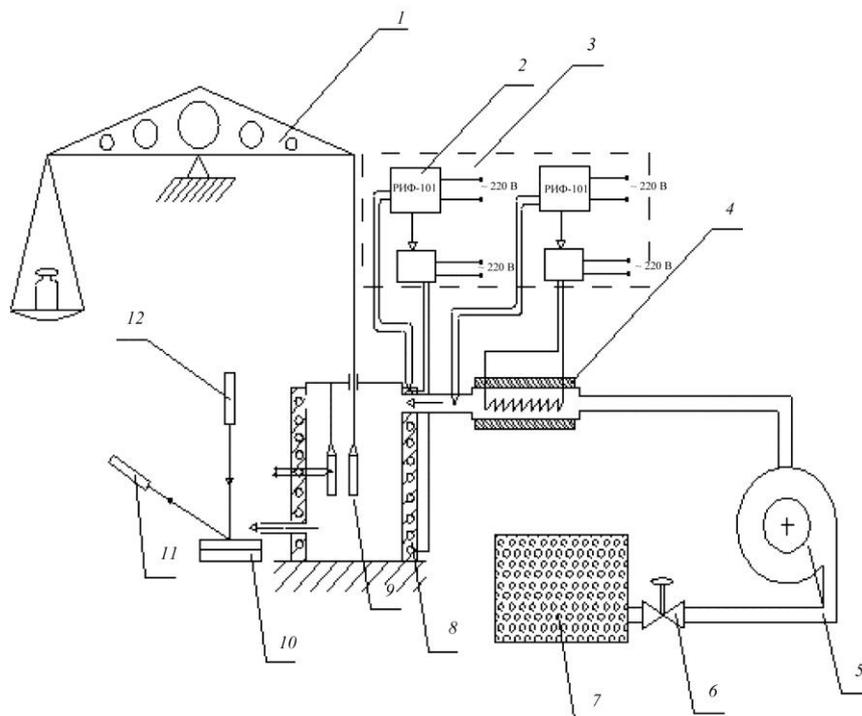


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

термопар, установленных на стенке камеры и в патрубке на выходе из воздухоподогревателя.

Воздух в камеру подается компрессором (5) в верхней части через впускное отверстие, а удаляется в нижней части через выпускное. Расход подаваемого воздуха составляет $0,007 \text{ м}^3/\text{с}$. Для выравнивания потока воздуха в верхней части камеры установлен рассекатель, что позволяет избежать циркуляционных и вихревых течений внутри камеры.

Из нижнего выпускного отверстия воздух подается на охлаждаемую полированную пластину (10) с регулируемой температурой. Пластина освещается источником света (12), отраженный световой поток попадает на приемник света (11). На полированной пластине при уменьшении ее температуры до температуры точки росы конденсируется влага, и интенсивность отраженного светового потока падает. Воздух, подаваемый в рабочую камеру установки, берется из холодильника (7) через вентиль (6). Температура внутри холодильника может меняться в диапазоне от комнатной до $-45 \text{ }^\circ\text{C}$. Это позволяет получать воздух соответствующей влажности.

Экспериментальные измерения проводили на двух идентичных образцах (9) из одного и того же материала, одинаковой геометрической формы, массы и плотности. Оба образца помещали в термостатированную камеру

установки в непосредственной близости друг от друга. Измерения показали, что разница температур образцов не превышала 0,5 °С. Один из образцов был подвешен на штوك, соединенный с коромыслом аналитических весов ВЛР-200 (I), на другом образце установлена хромель-копелевая термопара, соединенная с регистрирующим прибором АРРА-109. Показания аналитических весов считывали визуально через заданные интервалы времени. Организация эксперимента с использованием двух идентичных образцов позволила избежать очевидных технических проблем, связанных с одновременным измерением температуры образца и его взвешиванием.

Термогравиметрические исследования кинетики процесса сушки древесины проводили в воздушной среде с различной влажностью на образцах березы с разным начальным влагосодержанием. Темп нагрева – 1 К/мин от комнатной температуры до 110 °С (температуры выхода всей влаги). При идентичных условиях эксперимент повторяли от 3 до 7 раз. Ниже приведены кинетические параметры, рассчитанные по результатам экспериментов, являющихся средними в данной серии.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты термогравиметрических экспериментов на образцах древесины березы с начальной влажностью $W_{\text{нач}} = 20,02\%$ при сушке в воздухе с начальной относительной влажностью $\phi_{\text{нач}} = 21\%$ обрабатывали с использованием модели, предложенной в [1, 6], в целях получения кинетических параметров сушки для каждой стадии процесса.

Экспериментальные исследования показали, что процесс удаления связанной влаги из древесины березы протекает в 7 стадий. Результаты расчетов кинетических параметров для каждой стадии процесса приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты исследования кинетики сушки древесины березы (удаление связанной влаги)

Номер стадии	Температура, К			Безразмерная начальная масса	Энергия активации $\frac{E}{R}$, К	Частотный фактор, с^{-1}
	максимума скорости	начала стадии	конца стадии			
1	309	297	314	0,279	31 490	$8,260 \cdot 10^{43}$
2	315	301	320	0,219	27 120	$7,360 \cdot 10^{36}$
3	329	304	342	0,388	15 280	$1,358 \cdot 10^{19}$
4	325	317	328	0,040	50 830	$3,215 \cdot 10^{67}$
5	328	321	330	0,018	63 860	$1,971 \cdot 10^{84}$
6	331	326	333	0,012	90 260	$1,910 \cdot 10^{118}$
7	346	327	–	0,063	17 920	$3,386 \cdot 10^{20}$

По найденным кинетическим параметрам можно рассчитать изменение относительной массы образца. Сравнение экспериментальных и расчетных значений относительной массы образца приведено на рис. 2.

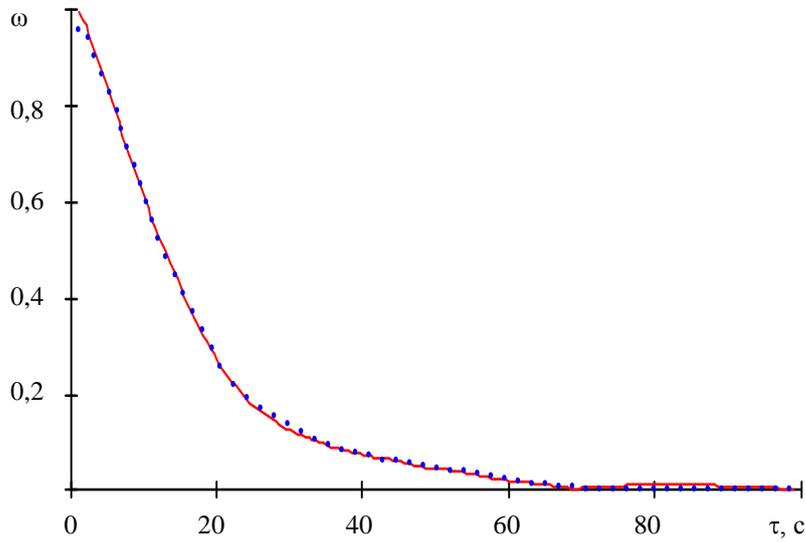


Рис. 2. Изменение относительной массы образца из древесины березы при сушке в воздушной среде (— — экспериментальные значения, — расчетные значения)

На рис. 3 представлено сравнение экспериментальных и расчетных значений производных по времени для относительной массы образца.

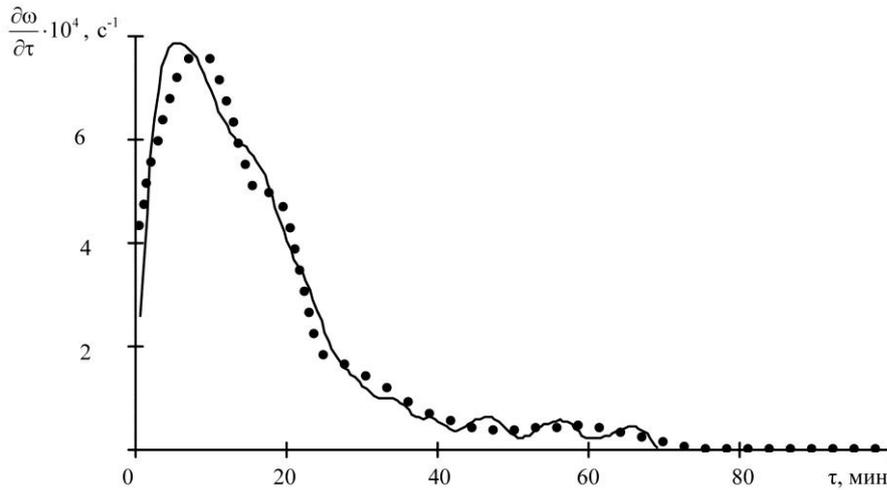


Рис. 3. Изменение производной по времени относительной массы образца из древесины березы при сушке в воздушной среде (— — производная экспериментальных значений потери массы; — сумма расчетных значений производных потери массы отдельных стадий)

Для изучения влияния влажности воздуха, подаваемого в камеру, на скорость сушки термогравиметрические эксперименты проводили в воздушной среде с различной начальной относительной влажностью. Влажность воздуха на входе в воздухоподогреватель варьировала от 3 до 91 %.

На рис. 4–6 представлены результаты исследования зависимости энергии активации трех стадий (с первой по третью) процесса сушки древесины березы от относительной влажности воздуха.

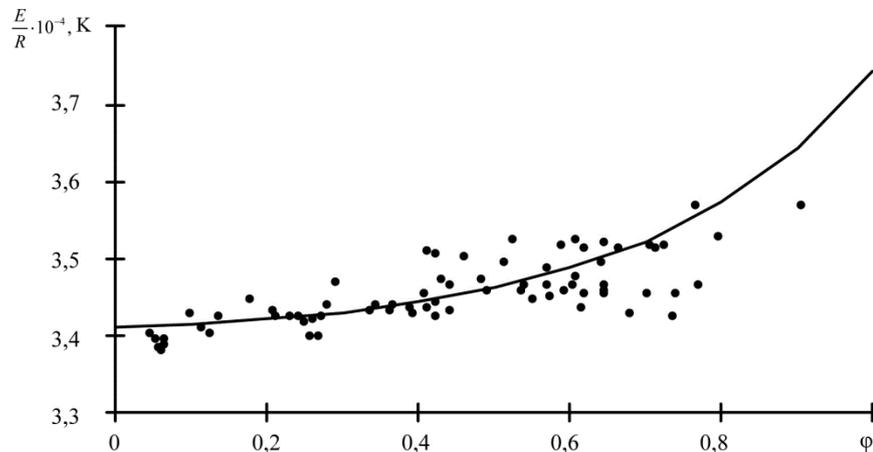


Рис. 4. Результаты исследования зависимости энергии активации первой стадии процесса сушки древесины березы от влажности среды (точки – значения, полученные в результате обработки экспериментальных данных; сплошная линия – эмпирическая зависимость (5))

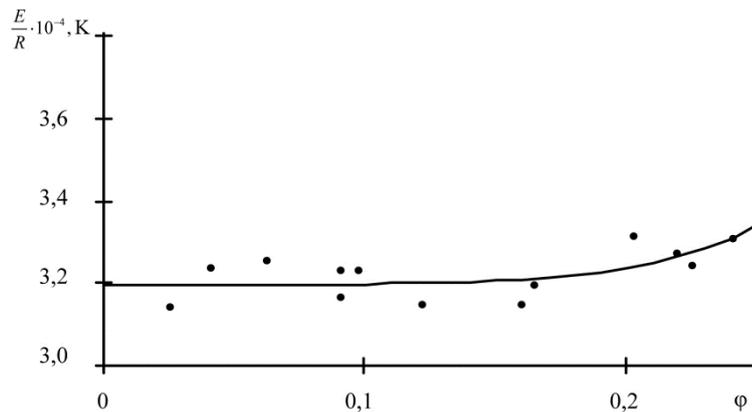


Рис. 5. Результаты исследования зависимости энергии активации второй стадии процесса сушки древесины березы от влажности среды (точки – значения, полученные в результате обработки экспериментальных данных; сплошная линия – эмпирическая зависимость (6))

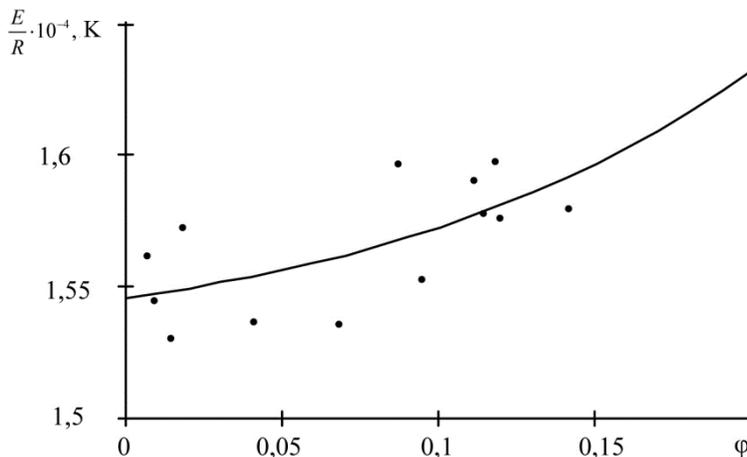


Рис. 6. Результаты исследования зависимости энергии активации третьей стадии процесса сушки древесины березы от влажности среды (точки – результаты обработки экспериментальных данных; сплошная линия – эмпирическая зависимость (7))

После обработки экспериментальных данных были получены эмпирические зависимости E от φ для первой, второй и третьей стадий процесса удаления связанной влаги из древесины березы:

$$E_1(\varphi) = 107,6 \cdot \exp(3,46 \varphi) + 34\,000; \quad (5)$$

$$E_2(\varphi) = 2,638 \cdot \exp(25,306 \varphi) + 3,1932 \cdot 10^4; \quad (6)$$

$$E_3(\varphi) = 219 \cdot \exp(8,01 \varphi) + 15\,236. \quad (7)$$

Полученные кинетические параметры удаления связанной влаги из древесины и зависимости энергии активации от влажности среды позволяют определить величину внутренних источников масс при удалении связанной влаги из древесины.

Для исследования кинетики сушки древесины при наличии свободной влаги были проведены термогравиметрические эксперименты по сушке древесины березы с различной начальной влажностью (табл. 2).

При обработке экспериментальных данных было установлено, что процесс сушки древесины березы с начальной влажностью $W_{\text{нач}} = 40,52\%$ протекает в 8 стадий. Относительная масса на первой стадии, соответствующей выходу свободной влаги, составляет $\omega_{0,1} = 0,28$. Влажность, приходящаяся на связанную влагу, $W_{\text{св}} = 29,2\%$, что хорошо согласуется с теоретическими данными [4, 5]. Стадии со второй по восьмую определяют выход связанной влаги. Кинетические параметры этих стадий хорошо согласуются с данными, приведенными в табл. 1.

Таблица 2

**Результаты исследования кинетики сушки древесины березы
при наличии свободной влаги**

Номер стадии	Температура, К			Безразмерная начальная масса	Энергия активации $\frac{E}{R}$, К	Частотный фактор, c^{-1}
	максимума скорости	начала стадии	конца стадии			
1	292/292	–	295/296	0,2710/0,3700	55932/32608	$5,091 \cdot 10^{80}/$ $1,019 \cdot 10^{46}$
2	294/296	–	303/298	0,2860/0,3330	34060/62035	$3,633 \cdot 10^{49}/$ $3,836 \cdot 10^{88}$
3	295/298	–/291	308/299	0,1350/0,1010	31090/11888	$2,852 \cdot 10^{44}/$ $6,820 \cdot 10^{170}$
4	297/299	–/296	311/301	0,2750/0,0460	14860/12763	$2,109 \cdot 10^{20}/$ $5,310 \cdot 10^{182}$
5	308/300	302/297	312/303	0,0570/0,1130	50660/72057	$1,142 \cdot 10^{69}/$ $8,870 \cdot 10^{101}$
6	315/304	309/298	318/307	0,0210/0,0130	65350/59866	$1,280 \cdot 10^{88}/$ $4,312 \cdot 10^{83}$
7	321/312	315/301	321/320	0,0024/0,0170	68130/23821	$2,330 \cdot 10^{90}/$ $9,974 \cdot 10^{30}$
8	317/330	–/324	325/333	0,0062/0,0026	19960/63970	$8,432 \cdot 10^{24}/$ $1,308 \cdot 10^{82}$
9	–/336	–/331	–/338	–/0,0042	–/89584	$–/4,660 \cdot 10^{113}$

Примечание. В числителе приведены данные для начальной влажности 40,52 %, в знаменателе – для начальной влажности 92,04 %.

Процесс сушки древесины березы с начальной влажностью $W_{нач} = 92,04\%$ протекает в 9 стадий. Выходу свободной влаги соответствуют первая и вторая стадии. Суммарная относительная масса для этих стадий $\omega_{0,1} + \omega_{0,2} = 0,686$. Стадии с третьей по девятую определяют выход связанной влаги. На них приходится 29,4 % влажности древесины, что хорошо совпадает с теоретическим значением.

Заключение

Предложенная модель адекватно описывает процесс удаления связанной влаги из древесины. Полученные для каждой стадии сушки березы кинетические параметры и их зависимости от влажности среды позволяют рассчитывать величину внутренних источников теплоты и массы в исследованиях тепло- и массообмена в древесине при сушке. В дальнейшем целесообразно изучить кинетику удаления связанной влаги из других пород древесины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермоченков М.Г., Евстигнеев А.Г., Кувик Т.Е. Термогравиметрические исследования кинетики термической сушки древесины: науч. тр. МГУЛ. 2007. Вып. 335. С. 36–46.
2. Ермоченков М.Г., Семенов Ю.П. Математическая модель процессов, протекающих в древесине при интенсивной сушке // Структура, свойства и качество древесины: тр. IV Междунар. симп. СПб.: СПбГЛТА, 2004. С. 530–533.
3. Ермоченков М.Г., Семенов Ю.П., Евстигнеев А.Г., Кувик Т.Е. Влияние относительной влажности воздуха в порах древесины на энергию активации парообразования при интенсивном нагреве // Технология и оборудование для переработки древесины: науч. тр. МГУЛ. 2008. Вып. 342. С. 9–13.
4. Серговский П.С., Расев А.И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины: учеб. для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Лесн. пром-ть, 1987. 360 с.
5. Чудинов Б.С. Вода в древесине. Новосибирск: Наука, 1984. 270 с.
6. Шведов Б.А. Энерго- и массообмен в материалах тепловой защиты многоразовых ракетно-космических систем: дис. ... д-ра техн. наук. М.: МЛТИ, 1990. 542 с.
7. Collignan A., Nadeau J.P., Puiggali J.R. Description and Analysis of Timber Drying Kinetics // Drying Technology. 1993. Vol. 11, iss. 3. Pp. 489–506.
8. Dincer I. Moisture Loss from Wood Products During Drying. Part I: Moisture Diffusivities and Moisture Transfer Coefficients // Energy Sources. 1998. Vol. 20, iss. 1. Pp. 67–75.
9. Fyhr C., Rasmuson A. Mathematical Model of Steam Drying of Wood Chips and Other Hygroscopic Porous Media // Aiche Journal. 1996. Vol. 42, iss. 9. Pp. 2491–2502.
10. Pang S., Haslett A.N. The Application of Mathematical Models to the Commercial High-Temperature Drying of Softwood Lumber // Drying Technology. 1995. Vol. 13, iss. 8-9. Pp. 1635–1674.
11. Peters B., Bruch C. Drying and Pyrolysis of Wood Particles: Experiments and Simulation // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2003. Vol. 70, iss. 2. Pp. 233–250.

Поступила 13.02.16

UDC 674.047

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.6.114

Kinetic Parameters of Wood Drying Process

M.G. Ermochenkov, *Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor*

Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University, ul. Pervaya Institutskaya, 1, Mytishchi, Moscow oblast, 141005, Russian Federation;

e-mail: ermochenkov@mgul.ac.ru

For citation: Ermochenkov M.G. Kinetic Parameters of Wood Drying Process. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 6, pp. 114–125. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.6.114

Heat treatment is widely used to modify the mechanical, physical and chemical, thermophysical, biological and other properties of wood. Drying is one of the types of thermal impact. We should develop mathematical models of the processes occurring in wood under thermal action to determine the optimal modes of drying and minimize energy costs. The author faces a task of describing internal heat and mass sources to make the mathematical descriptions of heat and mass transfer during drying. The moisture removal is regarded as a complex multi-stage physicochemical process. The stage of the drying process is due to the moisture in wood, connected with wood substance. The destruction of bonds occurs in their (different) temperature ranges. Individual stages are considered as parallel, independent chemical reactions and are described by kinetic equations. We develop and produce an experimental plant to study the kinetics of bound moisture removal in wood. This unit allows conducting thermogravimetric experiments in a controlled humidity environment. Samples for the study have different initial humidity at different environmental relative humidity. The results of thermogravimetric experiments are processed using a method separating the process into the stages. The bound moisture removal from wood proceeds in seven stages. For each stage, we determine the activation energy, the pre-exponential factor, and the initial mass fraction values. The dependence of kinetic parameters on the environmental relative humidity is studied. The author assumes that only the activation energy depends on the humidity of the drying agent. Empirical dependences of the activation energy on the environmental relative humidity for the first, second and third stages are obtained; thermogravimetric studies of the drying kinetics of wood with an initial moisture exceeding the fibre saturation point, i.e. in the presence of free moisture are undertaken; stepwise kinetic parameters are established.

Keywords: wood drying, drying kinetics, thermogravimetric study, kinetic parameter, environmental relative humidity.

REFERENCES

1. Ermochenkova M.G., Evstigneev A.G., Kuvik T.E. Termogravimetricheskie issledovaniya kinetiki termicheskoy sushki drevesiny [Thermogravimetric Research of the Kinetics of Thermal Drying of Wood]. *Nauchnye trudy Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa* [Works of Moscow State Forest University], 2007, iss. 335, pp. 36–46.
2. Ermochenkova M.G., Semenov Yu.P. Matematicheskaya model' protsessov, protekayushchikh v drevesine pri intensivnoy sushke [Mathematical Model of the Processes Occurring in Wood when Intensive Drying]. *Stroenie, svoystva i kachestvo drevesiny: tr. IV Mezhdunar. simp.* [The Structure, Properties and Quality of Wood: Proc. 4th Inter. Symp.]. Saint Petersburg, SPbSFTA Publ., 2004, pp. 530–533. (In Russ.)
3. Ermochenkova M.G., Semenov Yu.P., Evstigneev A.G., Kuvik T.E. Vliyaniye odnositel'noy vlazhnosti vozdukha v porakh drevesiny na energiyu aktivatsii paroobrazovaniya pri intensivnom nagreve [The Effect of Relative Air Humidity in the Wood Pores on the Activation Energy of Evaporation under Intense Heating]. *Tekhnologiya i oborudovaniye dlya pererabotki drevesiny: nauchnye trudy Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa* [Technology and Equipment for Wood Processing: Works of Moscow State Forest University], 2008, iss. 342, pp. 9–13. (In Russ.)
4. Sergovskiy P.S., Rasev A.I. *Gidrotermicheskaya obrabotka i konservirovaniye drevesiny* [Hydrothermal Treatment and Preservation of Wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1987. 360 p. (In Russ.)

5. Chudinov B.S. *Voda v drevesine* [Water in Wood]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984. 270 p. (In Russ.)
6. Shvedov B.A. *Energo- i massoobmen v materialakh teplovoy zashchity mnogorazovykh raketno-kosmicheskikh sistem: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Energy and Mass Transfer in Thermal Protection Materials of Reusable Space-Rocket Systems: Dr. Eng. Sci. Diss.]. Moscow, 1990. 542 p.
7. Collignan A., Nadeau J.P., Puiggali J.R. Description and Analysis of Timber Drying Kinetics. *Drying Technology*, 1993, vol. 11, iss. 3, pp. 489–506.
8. Dincer I. Moisture Loss from Wood Products During Drying – Part I: Moisture Diffusivities and Moisture Transfer Coefficients. *Energy Sources*, 1998, vol. 20, iss. 1, pp. 67–75.
9. Fyhr C., Rasmuson A. Mathematical Model of Steam Drying of Wood Chips and Other Hygroscopic Porous Media. *Aiche Journal*, 1996, vol. 42, iss. 9, pp. 2491–2502.
10. Pang S., Haslett A.N. The Application of Mathematical Models to the Commercial High-Temperature Drying of Softwood Lumber. *Drying Technology*, 1995, vol. 13, iss. 8-9, pp. 1635–1674.
11. Peters B., Bruch C. Drying and Pyrolysis of Wood Particles: Experiments and Simulation. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2003, vol. 70, iss. 2, pp. 233–250.

Received on February 13, 2016