

Синтез оптимальной по быстродействию системы управления сушкой пиломатериалов

А.Г. Гороховский^а, Е.Е. Шишкина^б

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский Тракт, 37, Екатеринбург, Россия

^а goralegr@yandex.ru, ^б elenashishkina@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0001-8847-8217>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-2584-4897>

Статья поступила 27.01.2021, принята 03.02.2021

Сушка является одним из этапов технологического процесса в различных областях промышленности, в том числе и в деревообрабатывающей. Это энергоемкий процесс, связанный со значительным расходом топлива и электроэнергии. При этом сушка является не только технологическим процессом, но и процессом, при котором в древесине происходят необратимые физико-механические, коллоидно-химические и биохимические изменения. Поэтому правильно организованный процесс сушки должен обеспечивать минимальные затраты энергии при максимально возможной скорости удаления влаги и наилучших технологических свойствах высушенной древесины. В этой связи вопросы оптимизации технологического процесса сушки являются весьма актуальными вследствие того, что при относительно небольших исходных затратах позволяют существенно повысить эффективность процесса. Автоматизация сушки пиломатериалов — необходимое условие улучшения технологии процесса и работы сушильных камер, средство повышения их эффективности. К настоящему времени проблемы, связанные с разработкой и внедрением средств дистанционного контроля и регулирования параметров сушильного агента в основном успешно преодолены, однако необходимо учитывать, что, помимо разработки средств контроля и регулирования процесса, необходим всесторонний анализ технологических особенностей, предпосылок автоматизации сушильных камер, в том числе математическое описание объектов управления. Создание средств контроля регуляторов должно обуславливаться свойствами объекта, требованиями, предъявляемыми к качеству регулирования. Особенно это необходимо при разработке оптимальных систем управления сушкой древесины, когда автоматика обеспечивает выбор и поддержание наиболее выгодного режима в данных условиях, т. е. позволяет выбрать наиболее эффективный режим в зависимости от требований к качеству материала и гибко переходить от одного режима к другому. Разработка и решение данной проблемы позволяет вывести технологию сушки пиломатериалов на принципиально новый уровень.

Ключевые слова: сушка пиломатериалов; параметры режима сушки; режимы сушки древесины; управление сушкой; системы автоматического управления.

Synthesis of an optimal speed control system for drying lumber

A.G. Gorohovsky^а, E.E. Shishkina^б

Ural State Forest Engineering University; 37, Sibirsky Tract St., Ekaterinburg, Russia

^а goralegr@yandex.ru, ^б elenashishkina@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0001-8847-8217>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-2584-4897>

Received 27.01.2021, accepted 03.02.2021

Drying is one of the stages of the technological process in various fields of industry, including woodworking processing. This is an energy-intensive process associated with significant fuel and electricity consumption. Moreover, drying is not only a technological process, but also a process in which irreversible physical, mechanical, colloid-chemical and biochemical changes occur in wood. Therefore, a properly organized drying process should ensure minimal energy consumption at the maximum possible rate of moisture removal and the best technological properties of dried wood. Important in this case is that the optimization of the drying process is very relevant due to the fact that at relatively low initial costs they can significantly increase the efficiency of the process. Automation of lumber drying is a necessary condition for improving process technology and operation of drying chambers, a means of increasing their efficiency. To date, the problems associated with the development and implementation of remote control means and regulation of the parameters of the drying agent have largely been successfully overcome. However, it must be borne in mind that in addition to the development of process control and regulation tools, a comprehensive analysis of technological features, preconditions for automation of drying chambers, including a mathematical description of control objects, is required. The creation of controllers for regulators should be determined by the properties of the object and the requirements for the quality of regulation. This is especially necessary when developing optimal control systems for drying wood, when automation ensures the selection and maintenance of the most favorable mode in these conditions, that is, it allows you to choose the most effective mode and flexibly switch from one mode to another, depending on the requirements for the material quality. The development and solution of this problem allows to bring the drying lumber technology to a whole new level.

Keywords: drying lumber; drying mode parameters; wood drying modes; drying control; automatic control systems.

Введение. Системы автоматического управления процессами конвективной сушки пиломатериалов на протяжении многих лет применяются в промышленности. Наиболее совершенные из них основаны на управлении величиной параметров режима сушки (в основном температуры и относительной влажности агента сушки) в функции текущей влажности сохнувшей древесины [1; 2]. При этом следует отметить, что системы оптимального управления практического применения в технологии сушки не нашли [3].

Применение систем оптимального управления в данном случае требует учитывать следующее:

1. Процесс сушки, который описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных теплообмена [4; 5,] рассматривается как объект с распределенными параметрами.

2. В качестве критерия оптимальности в основном используется минимальное время переходного процесса, т. е. системы оптимального управления сушкой следует рассматривать как системы, оптимальные по быстродействию.

3. В качестве метода решения задач оптимального управления для систем с распределенными параметрами наиболее применим принцип максимума, разработанный Л.С. Понтрягиным и его учениками [6].

Постановка и решение задачи. Процессы тепло- и массообмена при конвективной сушке изделий в виде пластины описываются приближенно системой ДУЧП, предложенной А.В. Лыковым [4] и подробно исследованной позднее [7–12]:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = -a_{11} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + a_{12} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + a_{13} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_{21} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + a_{22} \frac{\partial u}{\partial \tau}. \quad (2)$$

В частном случае, когда $a_{13} = 0$, первое уравнение системы (1) (массообмен) не зависит от второго. Граничные условия имеют вид:

$$\frac{\partial u(0, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial u(R, \tau)}{\partial x} = \xi(\tau);$$

$$\frac{\partial t(R, \tau)}{\partial x} = \varphi(\tau). \quad (3)$$

Функции $\xi(\tau)$ и $\varphi(\tau)$ в (3) будем рассматривать как управляющие, ограничения по ним имеют вид:

$$|\xi| \leq P_1(u_0, t_0), \quad |\varphi| \leq P_2(u_0, t_0), \quad (4)$$

где $u_0 = \int_0^R u(x, \tau) dx$, $t_0 = \int_0^R t(x, \tau) dx$

при этом: $\frac{u_0}{R}$ — среднее влагосодержание; $\frac{t_0}{R}$ — средняя температура; P_1, P_2 — заданные положительные непрерывные функции аргументов u_0, t_0 , определенные в некоторой области $u_{01} < u_0 < u_{02}, t_{01} < t_0 < t_{02}$.

В частном случае $P_1 = \text{const}, P_2 = \text{const}$.

Практический смысл условий (4) состоит в том, что при их невыполнении интенсивность массообмена, а значит, и перепад влагосодержания по толщине материала может превысить допустимую величину.

При этом внутренние напряжения в древесине могут стать больше допустимых, что, в свою очередь, приведет к растрескиванию и короблению высушиваемого материала [13; 14].

С некоторыми допущениями низкотемпературную сушку пиломатериалов можно рассматривать как процесс несвязанного теплообмена [15–21], так как он протекает при постоянной температуре, и влиянием теплообмена на массоперенос можно пренебречь. В этом случае уравнение переноса для неограниченной пластины имеет вид:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (0 \leq x \leq R, a_m = \text{const}) \quad (5)$$

при начальных и граничных условиях:

$$U(x, 0) = \varphi(x), \quad \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=R} = u(\tau),$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=0} = 0, \quad (6)$$

Функция $u(\tau)$, рассматриваемая как управляющая, имеет физический смысл плотности потока вещества на поверхности тела. В рассматриваемом случае:

$$u(\tau) = \alpha_m [U(R, \tau) - U_c(\tau)], \quad (7)$$

где $U_c(\tau)$ — состояние агента сушки, определяющее равновесную влажность древесины; a_m — коэффициент теплопроводности древесины; α_m — коэффициент теплообмена.

Вводится ограничение:

$$\left| \frac{\partial U}{\partial x} \right| \leq L \quad (0 \leq x \leq R), \quad (8)$$

Далее зададим конечное состояние U в виде функции $f(x)$ непрерывной и однозначной на отрезке $[0, R]$.

Пусть $U[u(\tau), \tau, x]$ — решение уравнения (5) при условиях (6).

Необходимо найти такое управляющее воздействие $u(\tau)$ ($0 \leq \tau \leq T$), чтобы при условии (8) выполнялось равенство:

$$U[u(T), T, x] = f(x), \quad (9)$$

причем время T было бы минимальным. Предполагается также, что такое управляющее воздействие существует.

Рассмотрим один из возможных вариантов приближенного решения и дадим оценку получаемой при этом погрешности вида:

$$\int_0^R \{U_*[u(T), T, x] - f(x)\}^2 dx < \delta, \quad (10)$$

где U_* — приближенное решение; δ — заданная допустимая погрешность.

В результате дифференцирования уравнения (5) по x получим:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right) = a_m \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right), \quad (11)$$

При этом ограничение (8) можно заменить ограничением:

$$\left| \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x=R} = |u(\tau)| \leq L, \quad (12)$$

Далее применим конечное интегральное косинус-преобразование по переменной x .

$$U_n(t) = \int_0^R U(x, R) \cos \frac{n\pi}{R} x dx \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (13)$$

где $U_n(t)$ — изображение $U(x, \tau)$ по переменной x . Оригинал находится по формуле:

$$U(x, \tau) = \frac{1}{R} U_0(\tau) + \frac{2}{R} \sum_{n=1}^{\infty} U_n(\tau) \cos \frac{n\pi}{R} x, \quad (14)$$

Применяя это преобразование к уравнению (5) и условиям (6) при заданной $f(x)$, получим:

$$\frac{dU_n}{d\tau} = - \left(\frac{an\pi}{R} \right)^2 U_n + (-1)^n a_m u(\tau), \quad (15)$$

$$C_{1n} = \int_0^R \varphi(x) \cos \frac{n\pi}{R} x dx, \quad (16)$$

$$C_{2n} = \int_0^R f(x) \cos \frac{n\pi}{R} x dx, \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (17)$$

В результате получим формулировку задачи оптимального быстродействия для бесконечной системы обыкновенных дифференциальных уравнений (15) при ограничении на управляющие воздействия типа:

$$|u(\tau)| \leq L$$

В дальнейшем будем рассматривать задачу оптимального быстродействия для конечного числа ($m + 1$) уравнений (15). При этом очень важно получить оценку погрешности, возникающую вследствие этого. Используя известное свойство рядов Фурье [22] и с учетом (14) и (17), получим:

$$\int_0^R [U(x, T) - f(x)]^2 dx = \frac{1}{R} [U_0(T) - C_{20}]^2 + \frac{2}{R} \sum_{n=1}^{\infty} [U_n(T) - C_{2n}]^2, \quad (18)$$

В результате искомая оценка имеет вид:

$$I = \int_0^R [U(x, T) - f(x)]^2 dx < \frac{1}{R} [U_0(T) - C_{20}]^2 + \frac{2}{R} \sum_{n=1}^m [U_n(T) - C_{2n}]^2 + \frac{2}{R} \sum_{n=m+1}^{\infty} \left\{ \left| C_{1n} e^{-\left(\frac{an\pi}{R}\right)^2 T} - C_{2n} \right| + L \left(\frac{R}{n\pi} \right)^2 \right\}^2 = \frac{2}{R} \sum_{n=m+1}^{\infty} \left\{ \left| C_{1n} e^{-\left(\frac{an\pi}{R}\right)^2 T} - C_{2n} \right| + L \left(\frac{R}{n\pi} \right)^2 \right\}^2, \quad (19)$$

Так как в момент времени $\tau = T$, имеем:

$$U_n(T) = C_{2n} \quad (n = 0, 1, 2, \dots, m)$$

В самом простом, но важном для практического применения случае, когда:

$$\varphi(x) = \text{const}, \quad f(x) = \text{const}$$

$C_{1n} = 0, C_{2n} = 0$ при $n > 0$, как это следует из (16), (17) оценка (19) приобретает вид:

$$I < \frac{2L^2 R^2}{\pi^4} \sum_{n=m+1}^{\infty} \frac{1}{n^4} = \frac{2L^2 R^2}{\pi^4} \left(\frac{\pi^4}{90} - \sum_{n=1}^m \frac{1}{n^4} \right), \quad (20)$$

так как [22]

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4} = \frac{\pi^4}{90}.$$

Отсюда следует, что правая часть неравенства (20) может стать сколь угодно малой, если m достаточно велико.

Таким образом, можно рассматривать задачу оптимального по быстродействию перемещения из точки $C_1 = (C_{10}, C_{11}, \dots, C_{1m})$ в точку $C_2 = (C_{20}, C_{21}, \dots, C_{2m})$ для $(m + 1)$ первых уравнений (15) при фиксированном m .

Результаты и их обсуждение. Порядок решения задачи по синтезу системы управления сушкой, оптимальной по быстродействию:

1. При постановке задачи в исходных данных должны быть определены:

- $\varphi(x)$ — начальное распределение влажности;
- $f(x)$ — конечное распределение влажности;
- R — половина толщины доски, m ;
- a_m — коэффициент теплопроводности древесины, m^2/c ;

$U_{сн}, U_{ск}$ — начальное и конечное состояния агента сушки, определяющие равновесную влажность древесины;

$I_{доп}$ — допускаемая погрешность вычислений.

2. По (20) определяется оценка погрешности вычислений и сравнивается с $I_{доп}$.

На основании этого принимается решение о величине m . Для большинства практических случаев достаточно $m = 0$.

3. По (16) и (17) определим величину C_{10} и C_{20} .

4. По (21) определяется количество циклов процесса оптимального управления:

$$n_{\text{ц}} = \frac{\bar{W}_n - \bar{W}_k}{\Delta W}, \quad (21)$$

где \bar{W}_n — средняя начальная влажность древесины; \bar{W}_k — средняя влажность древесины после сушки; ΔW — изменение влажности древесины за цикл (обычно $\Delta W = (1 - 2) \%$).

5. Изменение состояния среды по циклам оптимального управления определяется по (22):

$$\Delta U_p = \frac{U_{сн} - U_{ск}}{n_{\text{ц}}}. \quad (22)$$

6. Начальное управляющее воздействие принимается равным $L_0 = 1$. Такому управляющему воздействию соответствует начальная жесткость режима:

$$G_{po} = \frac{\bar{W}_n}{100} - U_{cn}. \quad (23)$$

Жесткость режима, соответствующая любому циклу:

$$G_{pi} = \left(\frac{W_n - \Delta W_n}{100} \right) - (U_{cn} - \Delta U_p n_i) \quad (24)$$

Коэффициент жесткости режима в конкретном цикле определяется как:

$$K_i = \frac{G_{pi}}{G_{p0}}, \quad (25)$$

7. После решения (14) – (17) и ряда упрощений для $m = 0$ определяется продолжительность цикла, с:

$$T_i = \frac{C_{10} - C_{20}}{a_m K_i}. \quad (26)$$

8. Общая продолжительность процесса сушки определяется как:

$$\tau_{сушки} = \sum_{i=1}^{n_u} T_i \quad (27)$$

9. Если $m = 0$ не соответствует начальным условиям задачи, необходимо задаться $(m + 1)$ — количеством уравнений в системе (17) при $m = 1$.

В этом случае система (15) примет вид:

$$\frac{dU_0}{d\tau} = a_m u, \quad \frac{dU_1}{dt} = -U_1 - a_m u, \quad (28)$$

где $|u| \leq 1$.

Искомое уравнение $u(\tau)$ должно обеспечивать в каждый момент времени максимум функции:

$$H = -\psi_1 U_1 + \psi_0 a_m u - \psi_1 a_m u. \quad (29)$$

Сопряженная система согласно принципу максимума имеет вид:

$$\frac{\partial \psi_0}{\partial \tau} = -\frac{\partial H}{\partial U_0} = 0, \quad \frac{\partial \psi_1}{\partial \tau} = -\frac{\partial H}{\partial U_1} = \psi_1. \quad (30)$$

Решение (30):

$$\psi_0(\tau) = C = \text{const}, \quad \psi_1(\tau) = \psi_1(T) \cdot e^{-(T-\tau)}, \quad 0 \leq \tau \leq T.$$

Таким образом, $u(\tau) = \text{sign}(C - \psi_1(T) \cdot e^{-(T-\tau)})$.

Решение системы (28) имеет вид (для $\tau = T$):

$$U_0(T) = C_{10} + (-1)^i a_m (2\tau_i - T), \quad (31)$$

$$U_1(T) = (-1)^i a_m (e^{-T} - 2e^{(\tau_i - T)} + 1), \quad (32)$$

где $i = 1, 2$; τ — время переключения, где сразу учтено, что $U_1(0) = 0$.

В момент $\tau = T$ требуется:

$$C_{20} = C_{10} + (-1)^i a_m (2\tau_i - T), \quad (33)$$

Литература

1. Гороховский А.Г. Технология сушки пиломатериалов на основе моделирования и оптимизации процессов теплопереноса в древесине: дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2008. 290 с.
2. Zhou Z., Wang K. Sliding Mode Controller Design for Wood Drying Process. Wood Science and Technology. 2018. V. 52, iss. 4. P. 1039–1048. URL: 10.1007/s00226-018-1006-1 <https://doi.org/>

$$(-1)^i a_m (e^{-T} - 2e^{(\tau_i - T)} + 1), \quad (34)$$

из (33) находим:

$$\tau_i = \frac{T}{2} - (-1)^i \beta, \quad (35)$$

где $\beta = \frac{C_{10} - C_{20}}{2a_m}$.

Подставляя τ_i в (34) и введя обозначение $y = e^{\frac{T}{2}}$, получим:

$$y^2 - 2ye^{(-1)^i \beta} + 1 = 0. \quad (36)$$

Решая (36), можно найти T и τ_i для каждого цикла оптимального управления.

Выводы.

1. Процесс сушки пиломатериалов можно рассматривать как систему оптимального управления с распределенными параметрами.

2. Принцип максимума является эффективным средством анализа систем с распределенными параметрами.

3. Наиболее эффективной системой управления процессом сушки является система, оптимальная по быстродействию.

4. Подход к низкотемпературной сушке как к процессу несвязанного тепло- и массообмена позволяет разработать достаточно простую методику концептуального проектирования оптимальной по быстродействию системы управления.

5. Управляющая функция, обеспечивающая минимальную продолжительность процесса сушки, имеет физический смысл плотности потока влаги на поверхности высушиваемого материала.

6. Бесконечная система дифференциальных уравнений, описывающая процесс оптимального управления, может с достаточной для практики точностью быть заменена системой из двух уравнений или даже одним уравнением.

7. Процесс оптимального управления сушкой может рассматриваться как пошаговый циклический, где в пределах каждого цикла определяются его продолжительность и величина управляющего воздействия.

8. В качестве управляющего воздействия целесообразно использовать изменение параметров агента сушки, в частности, его температуры и степени насыщенности, которые определяют текущее значение равновесной влажности.

9. Подбор общего вида функции, определяющей текущее значение равновесной влажности, является предметом дополнительного исследования.

3. Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Чернышев О.Н. Оптимальное управление процессами тепло-массообмена при конвективной сушке древесины // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 275.
4. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
5. Obataya E., Higashihara T. Reversible and Irreversible Dimensional Changes of Heat-Treated Wood during Alternate Wetting and Drying. Wood Science and Technology. 2017. V. 51, iss. 4. P. 739–749. URL: 10.1007/s00226-017-0918-5
6. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Л., Гамкрелидзе Р.В.,

- Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Физматгиз, 1961. 391 с.
7. Moises S.A., Pereira S. do L. Dealing with Empty and Overabundant Answers to Flexible Queries // *Journal of Data Analysis and Information Processing*. 2014. V. 2. № 1. P. 12–18. URL: 10.4236/jdaip.2014.21003.
 8. Nakagawa K., Tamura A., Adachi S. Optimization of Food Dye (Betanin) Retention during Hot Air Drying: Design Space Calculation with Consideration of Reaction and Substrate Transfer Kinetics // *Drying Technology*. 2018. V. 36, iss. 15. P. 1920–1929. URL: 10.1080/07373937.2018.1463538
 9. Jia X., Hayashi K., Zhan J., Cai Y. The Moisture Transfer Mechanism and Influencing Factors in Wood during Radio-Frequency // *Vacuum Drying*. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2016. V. 74, iss. 2. P. 203–210. URL: 10.1007/s00107-015-0985-y
 10. Da Silva W.P., e Silva C.M.D.P.S., Rodrigues A.F., de Figueirêdo R.M.F. One-Dimensional Numerical Solution of the Diffusion Equation to Describe Wood Drying: Comparison with Two- and Three-Dimensional Solutions // *Journal of Wood Science*. 2015. V. 61, iss. 4. P. 364–371. URL: 10.1007/s10086-015-1479-6
 11. Da Silva W.P., da Silva L.D., e Silva C.M.D.P.S., Nascimento P.L. Optimization and Simulation of Drying Processes Using Diffusion Models: Application to Wood Drying Using Forced Air at Low Temperature // *Wood Science and Technology*. 2011. V. 45, iss. 4. P. 787–800. URL: 10.1007/s00226-010-0391-x
 12. Azzouz S., Dhib K.B., Bahar R., Ouertani S., Elaieb M.T., Elcafsi A. Mass Diffusivity of Different Species of Wood in Convective Drying // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2018. V. 76, iss. 2. P. 573–582. URL: 10.1007/s00107-017-1212-9
 13. Zhao Y., Zhihui W., Iida I., Huang R., Lu J., Jiang J. Studies on Pre-Treatment by Compression for Wood Drying I: Effects of Compression Ratio, Compression Direction and Compression Speed on the Reduction of Moisture Content in Wood // *Journal of Wood Science*. 2015. V. 61, iss. 2. P. 113–119. URL: 10.1007/s10086-014-1451-x
 14. Phonetip K., Ozarska B., Brodie G.I. Comparing Two Internal Check Measurement Methods for Wood Drying Quality Assessment // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2017. V. 75, iss. 1. P. 139–142. URL: 10.1007/s00107-016-1115-1
 15. Safin R.R., Khasanshin R.R., Khakimzyanov I.F., Mukhametzyanov Sh.R., Kainov P.A. Increasing the Energy Efficiency of the Process of Oscillating Vacuum-Conductive Drying of Wood by Means of a Heat Pump // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017. V. 90, iss. 2. P. 310–317. URL: 10.1007/s10891-017-1569-y
 16. Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Чернышев О.Н. Повышение точности решения задачи тепломассообмена при анализе процесса сушки капиллярно-пористого тела // *Современные проблемы науки и образования: электрон. журнал*. 2015. № 2. URL: www.science-education.ru/122-21016.
 17. Шишкина Е.Е., Гороховский А.Г. О влиянии эффекта Жамена на термовлагопроводность древесины // *Вестн. Казанского технологического ун-та*. 2015. Т. 18. № 12. С. 92–95.
 18. Шишкина Е.Е., Гороховский А.Г. Оптимизация структуры и величины параметров режимов конвективной сушки пиломатериалов по показателям эффективности и качества // *Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад*. 2015. Вып. 213. С. 232–241.
 19. Шишкина Е.Е., Гороховский А.Г. Определение параметров неизотермического влагообмена при сушке древесины с учетом ее капиллярной проводимости // *Вестн. Казанского технологического ун-та*. 2015. Т. 18. № 19. С. 104–107.
 20. Шишкина Е.Е. Повышение точности моделирования процесса сушки пиломатериалов // *Современные проблемы переработки древесины: материалы междунар. науч.-практической конф.* СПб.: НП «НЦО МТД», 2015. С. 35–39.
 21. Шишкина Е.Е., Гороховский А.Г. Исследование неизотермического влагопереноса в древесине на модели коллоидного капиллярно-пористого тела // *Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса: сб. науч. тр. III Междунар. науч.-технической конф.* (21–24 сент. 2015 г.). Кострома: КГТУ, 2015. С. 45–48.
 22. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. *Справочник по математике (для инженеров и учащихся ВТУЗов)*. М.: Наука, 1986. 544 с.

References

1. Gorohovskij A.G. Lumber drying technology based on modeling and optimization of heat and mass transfer processes in wood: dis. ... d-ra tekhn. nauk. Ekaterinburg, 2008. 290 p.
2. Zhou Z., Wang K. Sliding Mode Controller Design for Wood Drying Process. *Wood Science and Technology*. 2018. V. 52, iss. 4. P. 1039-1048. URL: 10.1007/s00226-018-1006-1 https://doi.org/.
3. Gorohovskij A.G., SHishkina E.E., CHernyshev O.N. Optimal control of heat and mass transfer processes in convective wood drying // *Modern problems of science and education*. 2014. № 6. P. 275.
4. Lykov A.V. *Drying theory*. М.: Energiya, 1968. 472 p.
5. Obataya E., Higashihara T. Reversible and Irreversible Dimensional Changes of Heat-Treated Wood during Alternate Wetting and Drying. *Wood Science and Technology*. 2017. V. 51, iss. 4. P. 739–749. URL: 10.1007/s00226-017-0918-5.
6. Pontryagin L.S., Boltyanskij V.L., Gamkrelidze R.V., Mishchenko E.F. *Mathematical theory of optimal processes*. М.: Fizmatgiz, 1961. 391 p.
7. Moises S.A., Pereira S. do L. Dealing with Empty and Overabundant Answers to Flexible Queries // *Journal of Data Analysis and Information Processing*. 2014. V. 2. № 1. P. 12–18. URL: 10.4236/jdaip.2014.21003.
8. Nakagawa K., Tamura A., Adachi S. Optimization of Food Dye (Betanin) Retention during Hot Air Drying: Design Space Calculation with Consideration of Reaction and Substrate Transfer Kinetics // *Drying Technology*. 2018. V. 36, iss. 15. P. 1920-1929. URL: 10.1080/07373937.2018. 1463538.
9. Jia X., Hayashi K., Zhan J., Cai Y. The Moisture Transfer Mechanism and Influencing Factors in Wood during Radio-Frequency // *Vacuum Drying*. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2016. V. 74, iss. 2. P. 203–210. URL: 10.1007/s00107-015-0985-y.
10. Da Silva W.P., e Silva C.M.D.P.S., Rodrigues A.F., de Figueirêdo R.M.F. One-Dimensional Numerical Solution of the Diffusion Equation to Describe Wood Drying: Comparison with Two- and Three-Dimensional Solutions // *Journal of Wood Science*. 2015. V. 61, iss. 4. P. 364–371. URL: 10.1007/s10086-015-1479-6.
11. Da Silva W.P., da Silva L.D., e Silva C.M.D.P.S., Nascimento P.L. Optimization and Simulation of Drying Processes Using Diffusion Models: Application to Wood Drying Using Forced Air at Low Temperature // *Wood Science and Technology*. 2011. V. 45, iss. 4. P. 787–800. URL: 10.1007/s00226-010-0391-x.
12. Azzouz S., Dhib K.B., Bahar R., Ouertani S., Elaieb M.T., Elcafsi A. Mass Diffusivity of Different Species of Wood in Convective Drying // *European Journal of Wood and Wood*

- Products. 2018. V. 76, iss. 2. P. 573–582. URL: 10.1007/s00107-017-1212-9.
13. Zhao Y., Zhihui W., Iida I., Huang R., Lu J., Jiang J. Studies on Pre-Treatment by Compression for Wood Drying I: Effects of Compression Ratio, Compression Direction and Compression Speed on the Reduction of Moisture Content in Wood // *Journal of Wood Science*. 2015. V. 61, iss. 2. P. 113–119. URL: 10.1007/s10086-014-1451-x.
 14. Phonetip K., Ozarska B., Brodie G.I. Comparing Two Internal Check Measurement Methods for Wood Drying Quality Assessment // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2017. V. 75, iss. 1. P. 139–142. URL: 10.1007/s00107-016-1115-1.
 15. Safin R.R., Khasanshin R.R., Khakimzyanov I.F., Mukhametzyanov Sh.R., Kainov P.A. Increasing the Energy Efficiency of the Process of Oscillating Vacuum-Conductive Drying of Wood by Means of a Heat Pump // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017. V. 90, iss. 2. P. 310–317. URL: 10.1007/s10891-017-1569-y.
 16. Gorohovskij A.G., SHishkina E.E., CHernyshev O.N. Improving the solving accuracy the heat and mass transfer task in the analysis of the drying process of a capillary-porous body // *Modern problems of science and education: elektron. zhurnal*. 2015. № 2. URL: www.science-education.ru/122-21016.
 17. SHishkina E.E., Gorohovskij A.G. Influence of the Jamin effect on the thermal conductivity of wood // *Herald of Kazan Technological University (KNRTU)*. 2015. V. 18. № 12. P. 92–95.
 18. SHishkina E.E., Gorohovskij A.G. Optimization of the structure and parameter values of the convective drying modes of lumber in terms of efficiency and quality // *Izvestia SPbLTA*. 2015. Vyp. 213. P. 232–241.
 19. SHishkina E.E., Gorohovskij A.G. Determination of non-isothermal moisture exchange parameters during wood drying taking into account its capillary conductivity // *Herald of Kazan Technological University (KNRTU)*. 2015. V. 18. № 19. P. 104–107.
 20. SHishkina E.E. Improving the modeling accuracy of the lumber drying process // *Sovremennye problemy pererabotki drevesiny: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. SPb.: NP «NCO MTD»*, 2015. P. 35–39.
 21. SHishkina E.E., Gorohovskij A.G. Study of non-isothermal moisture transfer in wood using a model of colloidal capillary-porous body // *Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya lesopromyshlennogo kompleksa: sb. nauch. tr. III Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. (21–24 sent. 2015 g.)*. Kostroma: KGTU, 2015. P. 45–48.
 22. Bronshtejn I.N., Semendyaev K.A. *Handbook of mathematics (for engineers and students of technical schools)*. M.: Nauka, 1986. 544 p.