

4. Pat. No. 2425305 Russian Federation, IPC F26B5/04, F26B3/34. Ways of drying and heat treatment of wood / Safin R.R., Safin R.G., Razumov E.Yu., Khasanshin R.R., Kainov P.A., Kuzmin I.A., Mazokhin M.A., Shaikhutdinova A. .R., Akhtyamova T.N., Voronin A.E. - publ. 07/27/2011. (In Russ.)
5. Shageeva A.I., P.A. Kainov, R.R. Safin, R.R. Khasanshin. [Mathematical modeling of the processes of microwave drying of lumber in an oscillating mode] // Derevoobrabatyvayuschaya promyshlennost' [Woodworking industry]. 2022. No.2.pp.44-54. (In Russ.)
6. Safin R.R., Khakimzyanov I.F., Kainov P.A., Nikolaev A.N., Safina A.V. [Review of modern technological solutions to improve energy efficiency in the processes of drying lumber] //Vestnik Kazanskogo technologicheskogo universiteta [Bulletin of the Kazan Technological University]. 2014. Vol.17. No. 21. pp. 50-52.(In Russ.)
7. Safin R.R., Khasanshin R.R., Khakimzyanov I.F., Mukhametzyanov Sh.R., Kainov P.A. [Improving the energy efficiency of the process of oscillating vacuum-conductive drying of wood by using a heat pump]// Inzhenerno-fizicheskij zhurnal[Journal of Engineering Physics and Thermophysics]. 2017. V.90. No. 2. pp. 334-341.(In Russ.)
8. Safin R.R., Mukhametzyanov Sh.R., Kainov P.A., Shayakhmetova A.Kh. [Calculation method for vacuum-conductive drying of lumber using a heat pump] // Vestnik Moskovskogo universiteta lesa – lesnoy vestnik [Bulletin of the Moscow State University of Forests - Forest Bulletin]. 2015. Vol.29. No. 2. pp. 96-102.(In Russ.)
9. Safin R.G., Lashkov V.A., Golubev L.G., Safin R.R. Mathematical model of vacuum-oscillating drying of lumber // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2002. Vol. 75. No.2. pp.95-98.
10. Tuntsev D.V., Safin R.R., Hismatov R.G., Halitov R.A., Petrov V.I. The mathematical model of fast pyrolysis of wood waste// Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015. 2015. pp. 7414929.
11. Safin R.R., Voronin A.E., Shaikhutdinova A.R., Nazipova F.V., Kaynov P.A. Method of rational use of waste of timber industries // 15th International Multidisciplinary GeoConference SGEM 2015. Sofia, 2015. pp. 699-706.
12. Shageeva A.I., Safin R.R., Mukhametzyanov Sh.R., Porfiryeva K.M. [Mathematical modeling of lumber drying processes in the microwave environment] // Actual'nye problemy lesnogo kompleksa [Actual problems of the forestry complex]. 2020. No. 57. pp. 71-74. (In Russ.)
13. Kainov P.A., Mukhametzyanov Sh.R., Shamsutdinova A.I., Mukhtarova A.R. [Mathematical model of the lumber drying process in a vacuum microwave unit] // Derevoobrabatyvayuschaya promyshlennost' [Woodworking industry]. 2017. No. 4. pp. 17-21. (In Russ.)

©Shageeva A.I. – Post-graduate student of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU e-mail: sham.adilya@yandex.ru; Kainov P.A. – PhD of technical sciences, associate professor of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU e-mail: petr.k@plastline.org; Safin R.R. – Grand PhD in Engineering sciences, Professor, Head of the Department of Architecture and Design of Wood Products. KNRTU, e-mail: cfaby@mail.ru .

УДК 674.047.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕСОСУШИЛЬНЫХ КАМЕР С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ ВОЗДУХА

А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, А.В. Мяслицин

Сушка пиломатериалов во всей технологии деревообработки является наиболее энергозатратной. По данным различных исследователей доля электрической энергии в общих энергозатратах может составлять до 50 %. С учетом постоянного устойчивого роста цен на электроэнергию можно в ближайшие годы прогнозировать существенное увеличение стоимости сушки древесины, а вместе с этим и стоимости продукции деревообработки. Это приводит производителей и исследователей к необходимости обратиться к такому виду оборудования для сушки пиломатериалов как камеры с естественной циркуляцией воздуха, которые были весьма распространены в отечественной промышленности в 30-е – 50-е годы прошлого века. Наибольшее распространение получили камеры

системы В.Е. Грум-Гржимайло и некоторые другие. К преимуществам камер с естественной циркуляцией воздуха можно отнести отсутствие затрат электроэнергии на привод вентиляторов и их ремонт, а также простоту и более низкую стоимость самих камер. Наряду с указанными преимуществами камеры с естественной циркуляцией имеют и такие существенные недостатки как неравномерное высыхание материала по высоте штабеля, низкий коэффициент заполнения штабеля пиломатериалом, а также относительно большая продолжительность процесса сушки. По мнению многих исследователей причины недостатков камер с естественной циркуляцией кроются в крайне низкой скорости циркуляции (в пределах 0,2 м/с). Действительно, с увеличением скорости циркуляции воздуха по материалу сокращается продолжительность сушки и увеличивается производительность камер, но возрастают эксплуатационные расходы. При малой скорости движения воздуха доски просыхают неравномерно, наблюдается перепад влажности древесины на входе воздуха в штабель и выходе из него. Проходя через штабель воздух увлажняется, при малой скорости движения часть пути он проходит в насыщенном состоянии и поэтому не может захватывать с собой влагу из досок, лежащих дальше от входа в штабель. Если же скорость воздуха сравнительно велика, то благодаря большому его количеству и более быстрому прохождению его по материалу, штабель в целом более равномерно омывается воздухом. Таким образом, одной из основных проблем повышения эффективности камер с естественной циркуляцией является повышение скорости циркуляции и коэффициента заполнения штабеля.

Ключевые слова: сушка пиломатериалов, сушильные камеры с естественной циркуляцией воздуха

Введение

Проблемой влияния скорости циркуляции агента на процесс сушки занимались многие исследователи W.L. Greenhill [1], J.H. Junkins [2], П.С. Серговский [3], Н. Geul [4], Н. Sturany [5], А.К. Пухов [6], С.И. Мачулис [7] и др.

Резюмируя результаты приведенных выше исследований можно заключить, что вполне приемлемая скорость и равномерность сушки может быть достигнута уже при скорости циркуляции в пределах 0,8 – 1,0 м/с [8]. Именно такое значение скорости циркуляции рекомендует также И.В. Кречетов [9].

Традиционно в классических камерах с естественной циркуляцией (например [10]), применяется укладка штабеля со шпациями (в противном случае в камере не будет циркуляции). Однако такая укладка приводит к тому, что типичные значения величин коэффициента сопротивления движению воздуха составляют $\lambda = 100 \div 200$ и более (рис. 1). В то же время, при традиционной плотной укладке штабеля (без шпаций) величина данного коэффициента составляет в пределах $\lambda = 20 \div 40$.

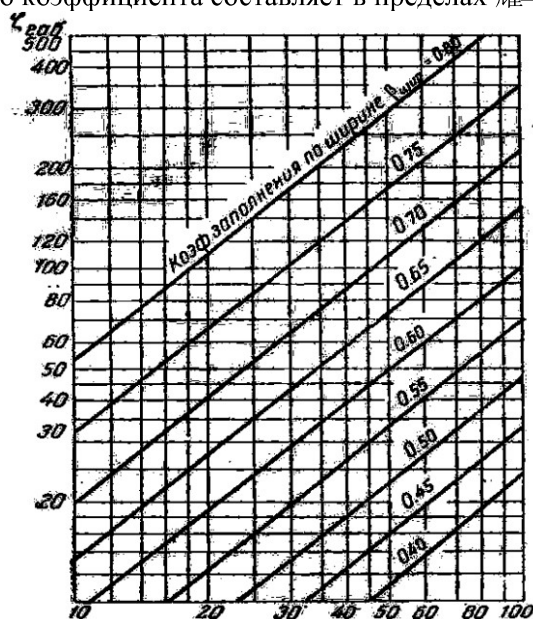


Рис. 1. Коэффициенты сопротивления штабелей при вертикальном движении воздуха и укладке со шпациями [11]

Следует отметить, что в эпоху широкого использования камер с естественной циркуляцией [12, 9] была предложена так называемая вертикальная штабелевка досок (рис. 2), позволяющая повысить коэффициент заполнения штабеля и снизить коэффициент сопротивления движению воздуха.

Однако данный способ формирования штабелей достаточно трудоемок и «требует специальных самозатягивающихся вагонеток и штабелевочной машины» [12].

Дополнительно интенсифицировать процесс сушки в камерах с естественной циркуляцией возможно за счет применения, так называемых осциллирующих режимов, основанных на явлении термовлагопроводности [13, 14].

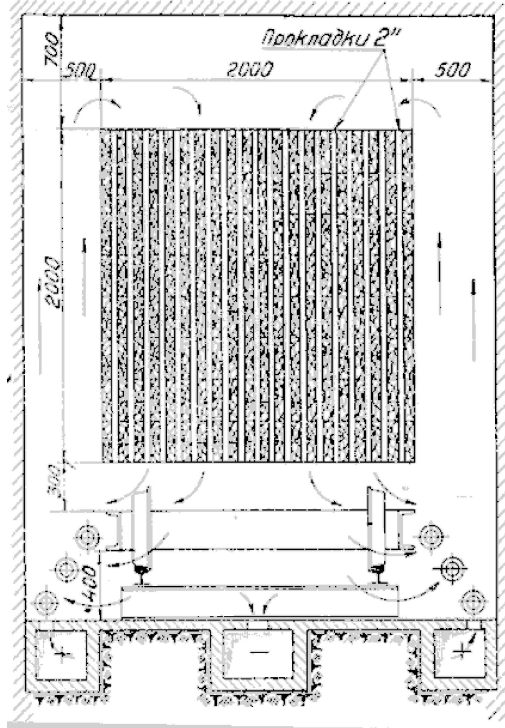


Рис. 2. Вертикальная штабелевка досок [12]

Методика проведения исследования

В УралНИИПДрев и УГЛТУ были проведены теоретические и экспериментальные исследования процессов сушки пиломатериалов в камерах с естественной циркуляцией агента [13, 14].

Процесс естественной циркуляции исследовался на основе гидравлической теории газов [15], разработанной В.Е. Грум-Гржимайло, а также теории свободных конвективных струй академика Г.Н. Абрамовича [16].

Процессы тепломассообмена в частности с использованием явления термовлагопроводности, а также с учетом неизотермичности исследовались как по традиционно применяемым методикам [17, 18, 19], так и по вновь разработанным оригинальным методикам [13, 14]. Особо это касается лабораторных и промышленных экспериментов.

Результаты исследования и их анализ

Запатентовано устройство по сути реализующее принцип ребровой укладки пиломатериалов [20] (рис. 3), но отличающееся тем, что пиломатериал укладывается на ребро в опорно-фиксирующую раму рядами, разделенными прокладками, на подштабельное устройство с уклоном от 2 до 45° к вертикали. При этом отпадает необходимость в самозатягивающихся вагонетках и штабелевочной машине.

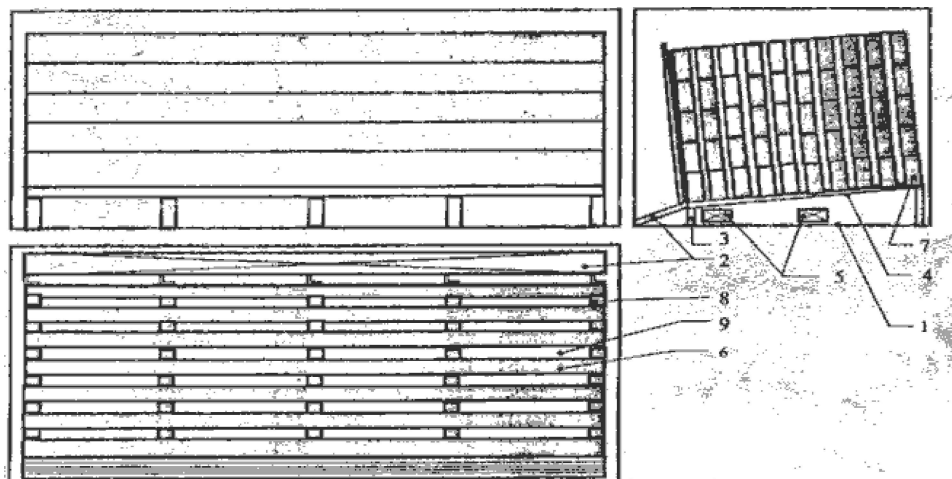


Рис. 3. Устройство для сушки пиломатериала [19]: 1 – корпус; 2 – калорифер; 3 – подштабельное устройство; 4 – опорно-фиксирующая рама; 5 – приточно-вытяжные каналы; 6 – доски; 7 – торец доски; 8 – прокладки; 9 – циркуляционные каналы в штабеле

1. Разработана теория естественной циркуляции с учетом статической и динамической составляющей теплового напора.

Результаты исследования позволяют заключить, что:

- применение патентованной конструкции штабеля [20] позволяет существенно снизить коэффициент аэродинамического сопротивления и, соответственно, повысить скорость естественной циркуляции;

- сопротивление штабеля воздушному напору зависит, с одной стороны, от квадрата скорости циркуляции, а с другой – от геометрических параметров штабеля, в первую очередь от соотношения толщины досок и прокладок;

- скорость естественной циркуляции главным образом определяется линейной тепловой мощностью нагревателя и толщиной высушиваемых пиломатериалов и может достигать 0,7 – 1,0 м/с [13].

3. Теоретически и экспериментально обоснована структура осциллирующих режимов сушки пиломатериалов в камерах с естественной циркуляцией. Доказано, что:

- за весь период сушки термовлагодупроводность работает на протяжении 35 – 38 % времени цикла.

При этом величина отрицательного градиента температуры составляет 2 – 2,5 °С (рис. 4);

- осциллирующие режимы оказываются существенно (на 10 – 20 %) эффективнее режимов сушки, рекомендованных РТМ [21] по продолжительности сушки.

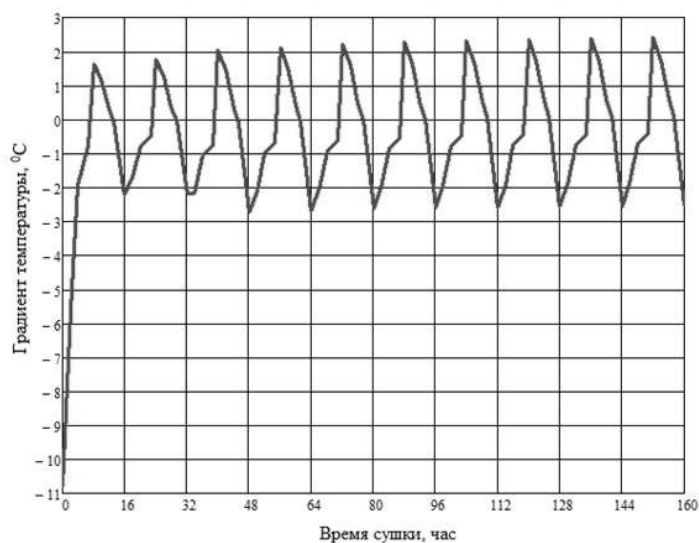


Рис. 4. Градиент температуры в древесине (осциллирующий режим) при среднем значении температуры среды: 70 °С

4. Проведены масштабные исследования в лабораторных и производственных условиях, которые позволили определить оптимальные значения параметров режима сушки.

4.1. Лабораторные исследования проводились в ОАО «УралНИИПДрев» на полупромышленной камере с естественной циркуляцией, имеющей объем разовой загрузки 2 м^3 (в условном пиломатериале при их длине 3 м) [8]. Выбранные в качестве управляющих факторов параметры режима сушки позволяют эффективно воздействовать на процесс сушки и изменять значения выходных параметров в весьма широких пределах. Применение рациональных значений параметров режимов сушки позволяет получить вполне приемлемые значения продолжительности процесса сушки пиломатериалов, неравномерности влажности, а также затрат энергии на сушку. Полученное значение времени сушки всего на 13% больше теоретически предельного и нормативного. Неравномерность влажности высушенных пиломатериалов соответствует требованиям I категории качества.

4.2. Внутренние напряжения во всех опытах реализованного плана соответствовали требованиям I – II категорий качества сушки. При этом требования I категории качества достигались при величине температуры охлаждения осциллирующего режима $70 \text{ }^\circ\text{C}$ и ниже. Полученные рациональные значения параметров режима ($t_{0}^{**}=66 \text{ }^\circ\text{C}$) позволяют надеяться на выполнения требований I категории качества по внутренним напряжениям. Низкие значения внутренних напряжений объясняются, с одной стороны, весьма мягким режимом сушки, а с другой стороны, особенностью осциллирующего режима. Ведь, по сути дела, осциллирующий режим является цепью циклических термовлагообработок, которые постоянно снимают внутренние напряжения. Кроме того, данные режимы позволяют полностью избежать таких дефектов сушки, как трещины, выплавление смолы, выпадения сучков.

4.3. Производственные испытания проводились на промышленной камере с естественной циркуляцией конструкции ОАО «ВСМПО-Ависма» (г. Верхняя Салда, Свердловской области (табл. 1).

Таблица 1 - Основные технические характеристики камеры

№ п/п	Наименование характеристики	Значение
1.	Габаритные размеры штабеля, мм	2000x1800x6000
2.	Емкость штабеля в условном пиломатериале, м^3	13,3
3.	Годовая производительность камеры в условном пиломатериале, $\text{м}^3/\text{год}$	970
4.	Теплоноситель	Пар
5.	Тепловая мощность калориферов, кВт	72,0
6.	Наличие системы автоматического контроля и управления	Да

Анализ результатов проведенных производственных исследований позволяет сделать следующие выводы:

– проведенные производственные исследования полностью подтвердили эффективность предложенных осциллирующих режимов;

– в исследованном диапазоне изменения управляющих факторов (температуры нагрева и охлаждения) качество сушки пиломатериалов высокое, в основном соответствующее I категории качества;

– подтвердились результаты лабораторных исследований в части влияния температуры на внутренние напряжения. При этом I категория качества сушки достигается при температуре $62 \text{ }^\circ\text{C}$ и ниже;

– качество сушки с точки зрения неравномерности влажности высокое, полностью соответствует I категории качества. Гарантированное качество сушки достигается при очень жестком соблюдении допуска на конечную влажность ($8 \pm 2 \%$). Вероятность соблюдения этого допуска составляет 94 – 99 %.

Разработанная технология сушки после апробации внедрена на ООО «ВСМПО-Ависма» (рис. 5).

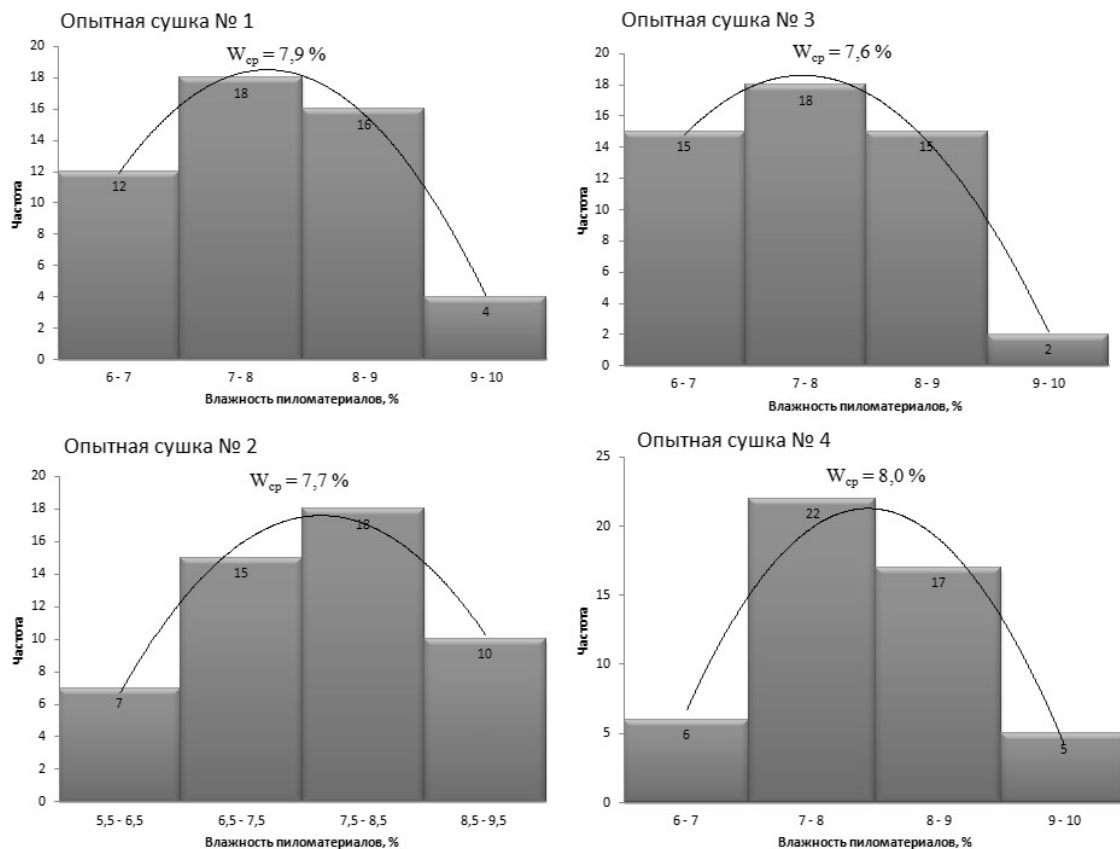


Рис. 5. Экспериментальное и теоретическое распределение конечной влажности пиломатериалов

5. Определен технико-экономический эффект внедренной технологии. Анализ результатов расчетов позволяет заключить, что стоимость затраченной энергии в случае сушки пиломатериалов в камере с естественной циркуляцией агента сушки в 3,9 раза меньше, чем при сушке в камере с принудительной циркуляцией [8].

Выводы

1. При современном соотношении цен на электрическую и тепловую энергию радикальным путем снижения энергозатрат и их стоимости на сушку пиломатериалов является применение камер с естественной циркуляцией агента сушки. К другим преимуществам камер этого типа можно отнести простоту конструкции и более низкую стоимость камеры, а также более низкие амортизационные и эксплуатационные затраты.

К недостаткам камер этого типа обычно относят большую продолжительность и неравномерность сушки пиломатериалов, и низкий коэффициент заполнения штабеля пиломатериалом.

2. Возможными путями преодоления недостатков камер с естественной циркуляцией являются следующие:

- повышение коэффициента заполнения штабеля пиломатериалом достигается применением, так называемой ребровой укладки или укладки на ребро в опорно-фиксирующую раму с уклоном. Кроме того, такая конструкция штабеля значительно снижает аэродинамическое сопротивление штабеля, что способствует существенному увеличению скорости циркуляции;

- снижение продолжительности сушки возможно за счет применения осциллирующих (ступенчатых, перемежающихся, цикловых) режимов сушки пиломатериалов, сущность которых заключается в периодическом нагреве-остывании древесины. В период охлаждения происходит бурное испарение влаги из древесины, причем в начальный период охлаждения интенсивность испарения влаги в 10 раз больше, чем при обычных методах сушки;

- экстремально низкая неравномерность сушки ($S = 0,2 - 0,3\%$ при $W_{ср} = 10\%$) достигается именно в камерах с естественной циркуляцией воздуха путем правильной организации процесса.

3. Аэродинамический анализ процессов в камере с естественной циркуляцией выявил две составляющие теплового напора: статическую и динамическую. Для расчета скорости циркуляции получено аналитическое выражение, связывающее все основные параметры камеры и штабеля пиломатериалов.

4. На скорость естественной циркуляции воздуха влияют главным образом две составляющие: линейная тепловая мощность нагревателя и конструкция штабеля.

Применение ребровой укладки при достаточной мощности нагревателя позволяет получить скорость циркуляции в пределах 0,7 – 1,0 м/с.

5. В результате теоретического анализа тепловых процессов (нагрева и охлаждения) в случае применения осциллирующих режимов построена эффективная структура режимов сушки пиломатериалов в камерах с естественной циркуляцией агента сушки.

6. Построены математические модели, представляющие собой зависимости качественных показателей сушки пиломатериалов в камере с естественной циркуляцией агента сушки от параметров режима.

7. В результате решения компромиссной задачи методом условного центра масс получены рациональные значения параметров режима сушки.

8. В производственных условиях подтверждена эффективность разработанной технологии при высоком качестве сушки пиломатериалов.

9. Внедрение разработанной технологии в производство позволило существенно снизить затраты непосредственно на сушку, эксплуатационные затраты, а также повысить качество суши ки.

Литература

1. Greenhill W.L. The effect of the rate of air circulation on the rate of drying of timber // Journal of the council of scientific and Industrial Research. Vol. IX. № 3. August, 1936.

2. Junkins J.H. Effect of rate of circulation of drying, Mitl, 1934. Wood Prod. Lab. of Canada.

3. Серговский П.С. Расчет процессов высыхания и увлажнения древесины. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952.

4. Geul H. Holzrocknung mit noken windgeschwindigkeit. Holz – Zentralblatt, 1952, Vg. 78, № 109, s. 1503, 1504, 1506.

5. Sturany H. Siromungsfragen beim Trocknen von Holz als Roh and Werkstoff. Holz – Zentralblatt, 1952. Vg. 10. № 5. S. 201-207.

6. Пухов А.К. Влияние скорости циркуляции агента сушки на продолжительность и качество сушки пиломатериалов // Деревообрабатывающая промышленность. 1965. № 8.

7. Мачулис С.И. Определение оптимальных скоростей воздуха в низкотемпературных камерах непрерывного действия при сушке мягкими режимами // Деревообрабатывающая промышленность. 1976. № 7.

8. Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е. Лесосушильные камеры с естественной циркуляцией воздуха: Моногр. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2007. - 120 с.

9. Кречетов И.В. Сушка древесины. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1949.

10. Сушило многократного насыщения с естественной циркуляцией: заявка 74241 Рос. Федерация / Грум-Гржимайло В.Е. (СССР); заявл. 25.10.1920.

11. Селюгин Н.С. Сушка древесины. М.; Л.: Гослестехиздат, 1949.

12. Андропова Н.А. Сушка и сушила для дерева. М.: ОНТИ, 1936.

13. Гороховский А.Г. Технология сушки пиломатериалов на основе моделирования и оптимизации процессов тепломассопереноса в древесине: дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2008. 290 с.

14. Шишкина Е.Е. Энергосберегающая технология конвективной сушки пиломатериалов на основе управляемого влагопереноса в древесине: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2016. – 40 с.

15. Бардин И.П., Грум-Гржимайло В.Е. Элементарная теория построения металлургических печей. М.; Л.: АН СССР, 1949.

16. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М.: Физматгиздат, 1960.

17. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 470 с.

18. 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, vol. 76, iss. 2, pp. 573–582. DOI: 10.1007/s00107-017-1212-9.

19. 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, vol. 45, iss. 4, pp. 787–800. DOI: 10.1007/s00226-010-0391-x.

20. Устройство для сушки пиломатериалов: Пат. 37815 Рос. Федерация / Агапов В.П., Гороховский А.Г.; заявл. 10.05.2004.

21. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины. Архангельск: ЦНИИМОД, 1985.

© **Гороховский А.Г.** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой управления в технических системах и инновационных технологий, ФГБОУ ВО Уральский государственный лесотехнический университет, goralegr@yandex.ru; **Шишкина Е.Е.** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры управления в технических системах и инновационных технологий, ФГБОУ ВО Уральский государственный лесотехнический университет, elenashishkina@yandex.ru; **Мялицин А.В.** – канд. техн. наук, доцент кафедры управления в технических системах и инновационных технологий ФГБОУ ВО Уральский государственный лесотехнический университет, mialitsin@gmail.com.

UDC 674.047

INCREASING THE EFFICIENCY OF DRYERS WITH NATURAL AIR CIRCULATION

A.G. Gorohovsky, E.E. Shishkina, A.V. Mialitsin

Hardwood is a very valuable material for domestic woodworking. However, only high quality drying can make it suitable for machining, gluing, finishing, etc. The very specific structure of the wood of these species leads to the fact that one of the most important characteristics of wood from the point of view of drying, namely the coefficient of moisture conductivity, takes extremely low values. If we add to this the easily achieved collapse of the surface of the drying assortment, it becomes clear that the drying process of such a material becomes extremely long and rather difficult to implement. The article provides an overview of literary sources on the selection and practical application of drying modes for sawn hardwood. A retrospective of the development of this direction is given based on materials from domestic and foreign sources.

Keywords: lumber drying modes, mode structure, mode stage, stepless modes

References

1. Greenhill W.L. The effect of the rate of air circulation on the rate of drying of timber // Journal of the council of scientific and Industrial Research. Vol. IX. № 3. August, 1936.
2. Junkins J.H. Effect of rate of circulation of drying. Mitll, 1934. Wood Prod. Lab. of Canada.
3. Sergovsky P.S. Calculation of the processes of drying and moistening of wood. M.; L.: Goslesbumizdat, 1952.
4. Geul H. Holzrocknung mit noken windgeschwindigkeit. Holz – Zentralblatt, 1952, Vg. 78, № 109, s. 1503, 1504, 1506.
5. Sturany H. Siromungsfragen beim Trocknen von Holz als Roh and Werkstoff. Holz – Zentralblatt, 1952. Vg. 10. № 5. S. 201-207.
6. Pukhov A.K. Influence of the drying agent circulation rate on the duration and quality of lumber drying./ Woodworking industry, 1965. № 8.
7. Machulis S.I. Determination of optimal air velocities in low-temperature chambers of continuous action during drying with soft modes // Woodworking industry. 1976. No. 7.
8. Gorohovsky A.G., Shishkina E.E. Wood-drying chambers with natural air circulation: Monograph. - Yekaterinburg: Ural. state forest engineering un-t, 2007. - 120 p.
9. Krechetov I.V. Drying wood. M.; L.: Goslesbum-published, 1949.
10. Dryer of multiple saturation with natural circulation: application 74241 Ros. Federation / Grum-Grzhimailo V.E. (THE USSR); dec. 10/25/1920.
11. Selyugin N.S. Drying wood. M.; L.: Gosleste-khizdat, 1949.
12. Andronova N.A. Drying and drying for wood. M.: ONTI, 1936.

13. Gorokhovskiy A.G. Sawn Timber Drying Technology Based on Modeling and Optimization of Heat and Mass Transfer Processes in Wood: Dr. Eng. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2008. 263 p.
14. Shishkina E.E. Energy-Saving Technology for Convective Drying of Sawn Timber Based on Controlled Moisture Transfer in Wood: Dr. Eng. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2016. 40 p.
15. Bardin I.P., Grum-Grzhimailo V.E. Elementary theory of construction of metallurgical furnaces. M.; L.: AN SSSR, 1949.
16. Abramovich G.N. Theory of turbulent jets. Moscow: Fizmatizdat, 1960.
17. Lykov A.V. Drying Theory. Moscow, Energiya Publ., 1968. 470 p.
18. 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, vol. 76, iss. 2, pp. 573–582. DOI: 10.1007/s00107-017-1212-9.
19. 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, vol. 45, iss. 4, pp. 787–800. DOI: 10.1007/s00226-010-0391-x.
20. Device for drying lumber: Pat. 37815 Ros. Federation / Agapov V.P., Gorokhovskiy A.G.; for-yavl. May 10, 2004.
21. Guiding technical materials on the technology of chamber drying of wood. Arkhangelsk: TsNIIMOD, 1985.

©Gorokhovskiy A.G. – Grand PhD in Engineering sciences, Professor, Head of the Department of Management in Technical Systems and Innovative Technologies, Ural State Forestry University (USFU), e-mail: goralegr@yandex.ru; Shishkina E.E. – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Management in Technical Systems and Innovative Technologies, USFU, e-mail: elenashishkina@yandex.ru; Mialitsin A.V. – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Management in Technical Systems and Innovative Technologies, Ural State Forestry University, e-mail: mialitsin@gmail.com.

УДК 66.046

ПРОГРАММНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРАКЦИИ ЦЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

А.В. Сафина, Е.Н. Ахметханова, Р.Р. Сафин, Л.Ю. Исмаилов, Е.И. Байгильдеева

Разработана математическая модель процесса экстракции ценных компонентов из растительного сырья, в частности березового гриба чаги. Описана методика проведения аналитических исследований процесса экстракции. Проанализировано влияние изменения коэффициента массопроводности на продолжительность процесса экстракции. Установлен оптимальный размер частиц чаги, при котором обеспечивается высокая скорость извлечения ценных компонентов при рациональной продолжительности процесса. Были представлены профили изменения концентрации экстрактивных веществ по сечению частицы с течением времени в процессе экстрагирования чаги. Выявлено, что активный процесс экстракции наблюдается в поверхностном слое в начале процесса и характеризуется достаточно быстрым падением концентрации в каждом последующем слое. Изучено влияние размера частиц на продолжительность процесса экстракции. Установлен оптимальный размер частиц чаги, при котором обеспечивается высокая скорость извлечения ценных компонентов при рациональной продолжительности процесса. Результаты математического моделирования получены с использованием программной среды Visual Basic for Applications.

Ключевые слова: экстракция, растительное сырье, математическая модель, моделирование, березовый гриб чага.

Введение

Экстракция лекарственного растительного сырья является неотъемлемым и важным процессом в фитохимическом производстве. Теория и практика процесса экстракции интенсивно развиваются в