

Физико-механические процессы в деревообработке

УДК 674.047.3

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ СХЕМЫ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА ВАКУУМНОЙ СВЧ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

А.И. Шагеева, П.А. Кайнов, Р.Р. Сафин

В статье рассмотрены пути повышения энергоэффективности процессов сушки пиломатериалов в электромагнитной среде. Описана разработанная энергосберегающая схема введения процесса вакуумной СВЧ сушки в режиме осцилляции давления среды. Представлена инженерная методика расчета предложенной схемы вакуумной СВЧ сушильной установки с тепловым насосом. Энергообеспечение данной установки предложено осуществлять электрогенератором, работающим за счет выработки электроэнергии на отходах деревообработки. Представлены результаты анализа энергопотребления агрегатов сушильной установки в зависимости от объема загрузки высушиваемых пиломатериалов.

Ключевые слова: сушильная камера, СВЧ-нагрев, осциллирующий режим, древесина, вакуумный насос, тепловой насос

Введение

В связи с интенсивным ростом потребления топливно-энергетических ресурсов внедрение энергосберегающих технологий является одним из важных направлений повышения эффективности производства и умелого ведения технологических процессов. При этом к наиболее энергоемким процессам можно отнести операции сушки, которые обуславливаются высокими энергетическими и временными затратами. Сократить продолжительность процесса без ущерба к качеству высушиваемых пиломатериалов позволяет техника сушки, осуществляемая в условиях пониженного давления [1,2,3,4]. Однако, несмотря на неоспоримые преимущества, при вакуумной сушке возникает проблема подвода тепловой энергии к высушиваемому материалу, поэтому применение СВЧ поля в процессах сушки пиломатериалов является перспективным направлением развития процесса. При этом данный способ подвода тепловой энергии к материалу является достаточно сложно регулируемым без применения дополнительной конвективной или иной составляющей. Кроме того, неэффективное потребление электроэнергии СВЧ генератором ставит под вопрос дальнейшие перспективы данной технологии сушки. Одним из решений данных вопросов является использование импульсных технологий, которые применительно к вакуумным методам получили распространение в виде осциллирующих режимов. В работе [5] было представлено математическое описание и результаты математического моделирования процессов СВЧ-сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме, которые позволили определить перспективы развития данного метода сушки древесины. В этой связи в данной работе была поставлена задача разработки энергоэффективной схемы технологии вакуумной СВЧ сушки при осциллирующем режиме [6,7,8,9].

Методы и материалы

В последние годы для снижения энергетических затрат наибольшее внимание уделяется использованию альтернативных источников энергии, в частности отходов деревообработки [10,11]. Для реализации СВЧ сушки пиломатериалов была разработана схема процесса, при которой на стадии импульса используется СВЧ-нагрев, а на стадии вакуумирования в работу включаются тепловой и вакуумный насосы. При этом энергообеспечение СВЧ генератора, теплового и вакуумного насосов осуществляется от электрогенератора, работающего на генераторном газе, получаемом из отходов деревообработки (рис.1).

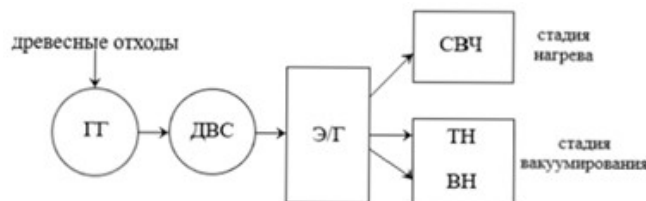


Рис.1. Схема осциллирующей СВЧ сушки пиломатериалов, работающей на продуктах газификации отходов деревообработки

На основе проведенных исследований [12,13] по разработанной технологии была разработана пилотная установка для сушки древесных материалов в СВЧ среде, которая работает следующим образом (рис.2). Измельченные влажные древесные отходы из бункера хранения поступают в сушильный бункер 1, куда вентилятором 10 нагнетается горячий воздух для их предварительной подсушки. Нагрев воздуха осуществляется с помощью тепловой энергии, отведенной тепловым насосом от испаренной в камере 11 влаги. Далее подсушенные древесные отходы подаются питателем из бункера 1 в газификатор 2, в котором происходит термохимическая конверсия отходов древесного сырья с последующим получением генераторного газа. Полученный генераторный газ после очистки от пылевидных частиц и остаточных смол в системе очистки 3, состоящем из циклона и фильтра тонкой очистки, поступает в двигатель внутреннего сгорания 4 для выработки электроэнергии в электрогенераторе 5. Полученная электроэнергия обеспечивает работу компрессора 7 теплового насоса, вакуумного насоса 9, вентилятора 10 на стадии вакуумирования и СВЧ генератора с магнетронами 6 на стадии нагрева.

Сушку материала проводят следующим образом: высушиваемый материал 12 помещают в сушильную камеру 11. После загрузки материала и закрытия камеры ведут стадию нагрева при атмосферном давлении среды, для этого в работу включают СВЧ генератор. Продолжительность стадии начального нагрева определяется достижением температуры в центре высушиваемого материала 12 заданного значения. Вслед за этим ведут стадию вакуумирования, для этого в работу включают компрессор 7 теплового насоса и вакуумный насос 9, отключают магнетроны 6, и сушка древесины происходит за счет предварительно акумулированной тепловой энергии. Отводимая из сушилки 11 тепловая энергия передается тепловым насосом 7 в калорифер 13 для нагрева агента сушки, подаваемого в сушильный бункер 1 вентилятором 10.

Выдержка под вакуумом осуществляется до снижения температуры в центре высушиваемого материала 12 до заданного значения, при котором градиент температуры не будет оказывать существенного влияния на процесс дальнейшего удаления влаги. После окончания стадии вакуумирования открытием напускного клапана в сушильную камеру 11 нагнетается атмосферный воздух и начинается стадия СВЧ нагрева материала. После завершения стадии вакуумирования цикл «нагрев-вакуум» повторяется. На стадии вакуумирования происходит увеличение влажности воздушной среды в сушильной камере 11 и выравнивание влажности по сечению пиломатериала, что способствует снятию возникших напряжений. Таким образом осуществляется чередование стадий прогрева и вакуумирования в процессе вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме, что в свою очередь позволяет отказаться от проведения промежуточной и конечной влаготеплообработки.

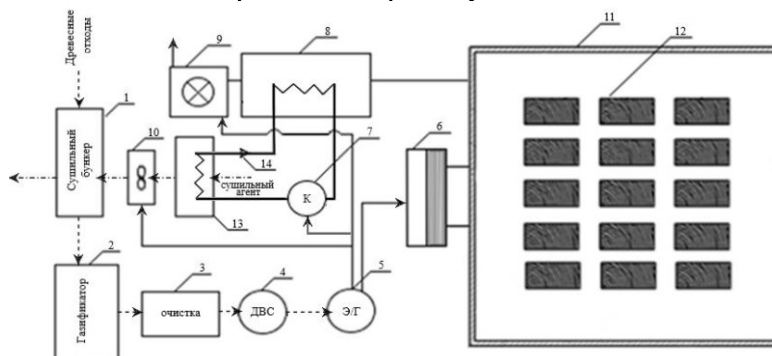


Рис.2. СВЧ сушильная камера с тепловым насосом: 1 – сушильный бункер с древесными отходами; 2 – газификатор; 3 – система очистки газа; 4 – двигатель внутреннего сгорания; 5 – электрогенератор; 6 – магнетрон СВЧ генератора; 7 – компрессор теплового насоса; 8 – конденсатор; 9 – вакуумный насос; 10 – вентилятор; 11 – сушильная камера; 12 – высушиваемый материал; 13 – калорифер; 14 – дроссель

Для определения основных энергетических показателей различных агрегатов сушильного комплекса была разработана инженерная методика расчета.

Основным параметром в инженерной методике расчета узлов предложенной конструктивной схемы сушильной установки является поток влаги, испаряющейся из материала, находящегося в камере 11, который определяется в результате математического моделирования, описанного в [5]

$$j_{\text{м.пов}} = \rho_0 \cdot \left(a_m \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} + a_m \cdot \delta \cdot \frac{\partial T_x}{\partial x} \Big|_{x=0} \right), \quad (1)$$

где ρ_0 – плотность древесины, кг/м³; a_m – коэффициент массопроводности, м²/с; U – влагосодержание древесины; T_m – температура материала, °С; δ – относительный термоградиентный коэффициент, 1/°С.

Площадь поверхности высушиваемого материала определяется уравнением

$$F_{\text{пов.м}} = \frac{V_{\text{др.}}}{S_{\text{пил.}}} \cdot 2, \quad (2)$$

где $V_{\text{др.}}$ – объем высушиваемой древесины, м³; $S_{\text{пил.}}$ – толщина пиломатериалов, м.

Расход испаряющейся из древесины влаги находится как

$$P_{\text{исп.вл.}} = F_{\text{пов.м}} \cdot j_{\text{м.пов}}. \quad (3)$$

Отсюда тепловой напор конденсатора

$$Q_{\text{тепл.}} = P_{\text{исп.вл.}} \cdot r, \quad (4)$$

где r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг.

Зная, что на передачу тепловой энергии тепловым насосом затрачивается в 3÷5 раз меньшая электроэнергия, то требуемая мощность теплового насоса равна

$$N_k = \frac{Q_{\text{тепл.}}}{3 \div 5} \cdot \eta_k. \quad (4)$$

где η_k – КПД компрессора теплового насоса.

Задавая время τ_0 , в течение которого давление газа необходимо понизить с барометрического $P_{\text{атм}}$ до рабочего остаточного значения $P_{\text{ост}}$, определяем производительность вакуумного насоса

$$V_{\text{св}} = \frac{V_{\text{св}}}{\tau_0} \cdot \ln \frac{P_{\text{атм}}}{P_{\text{ост}}}, \quad (5)$$

где $V_{\text{св}}$ – свободный объем камеры сушки, м³.

Мощность вакуумного насоса можно определить из выражения

$$N_{\text{вн}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot V_{\text{св}}}{\eta_{\text{вн}}}. \quad (6)$$

Производительность вентилятора, обеспечивающего сушку отходов с необходимой производительностью бункера 1 можно определить из выражения

$$P_{\text{вент}} = \left(\frac{Q}{c_{\text{возд.}} \cdot \Delta T} \cdot \frac{1}{\rho_{\text{возд.}}} \right), \quad (7)$$

где Q – количество тепла, необходимого для испарения влаги из древесных отходов, Дж/с; $c_{\text{возд.}}$ – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С); ΔT – разность температур воздуха на входе и выходе из бункера 1, °С; $\rho_{\text{возд.}}$ – плотность воздуха, кг/м³.

Скорость воздуха, подаваемого вентилятором в сушильный бункер 1, определяется как

$$v = \frac{P_{\text{вент.}}}{R_{\text{кам.}}}, \quad (8)$$

где $R_{\text{кам.}}$ – сечение бункера, м².

Тогда мощность вентилятора определяем из выражения

$$N_{\text{вен}} = \xi \frac{\rho_{\text{возд}} \cdot v^2}{2} \cdot \Pi_{\text{вен}} \cdot \eta_{\text{вен}}, \quad (9)$$

где ξ – местное сопротивление сыпучего материала; $\eta_{\text{вен}}$ – КПД вентилятора.

Отсюда, необходимая мощность электрогенератора определяется как

$$N_{\text{э/г}} \approx N_{\text{к}} + N_{\text{вн}} + N_{\text{вен}} \approx N_{\text{СВЧ-ген}}. \quad (10)$$

Для проведения инженерного расчета параметров разработанного сушильного комплекса были использованы следующие данные: порода высушиваемой древесины – сосна с $\rho_6 = 400 \text{ кг/м}^3$; объем загрузки камеры сушки – 10, 15, 20 м^3 ; фактический объем штабеля древесины – 5,88; 8,82; 11,76 м^3 ; свободный объем камеры – 4,12; 6,18; 8,24 м^3 .

Результаты

Для определения требуемой мощности электрогенератора в зависимости от объема загрузки камеры были проведены исследования процесса СВЧ сушки пиломатериалов в режиме осцилляции давления среды [12,13], позволяющие определить исходные данные для инженерной методики расчета.

По результатам расчета по предложенной инженерной методике была получена номограмма (рис. 3), по которой можно определить требуемую мощность электрогенератора в зависимости от толщины высушиваемых пиломатериалов.

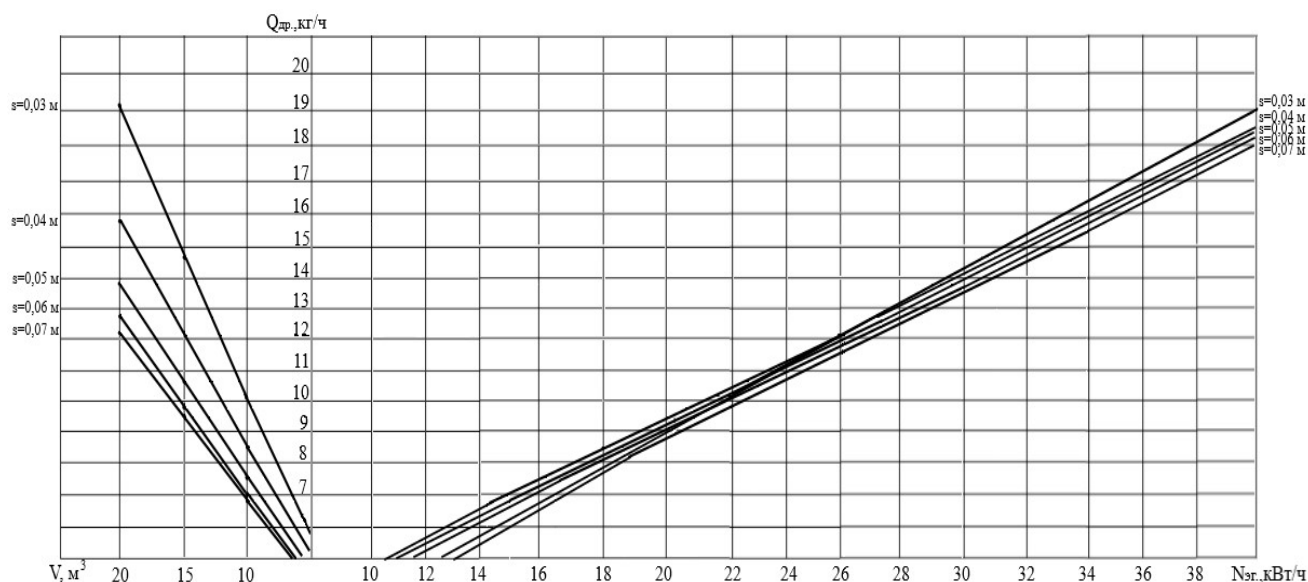


Рис.3. Номограмма мощности электрогенератора в зависимости от объема загрузки сушильной камеры

Кроме того, в ходе проведенных расчетов был установлен необходимый на два часа сушки объем сушильного бункера с древесными отходами, обеспечивающий проведение процесса предварительной подсушки в течении 2 часов, в зависимости от объема загрузки сушильной камеры (рис. 4). Из представленных графиков видно, что с увеличением толщины высушиваемых пиломатериалов снижается потребляемая мощность сушильного комплекса, что позволяет снизить капитальные затраты на проведение процесса.

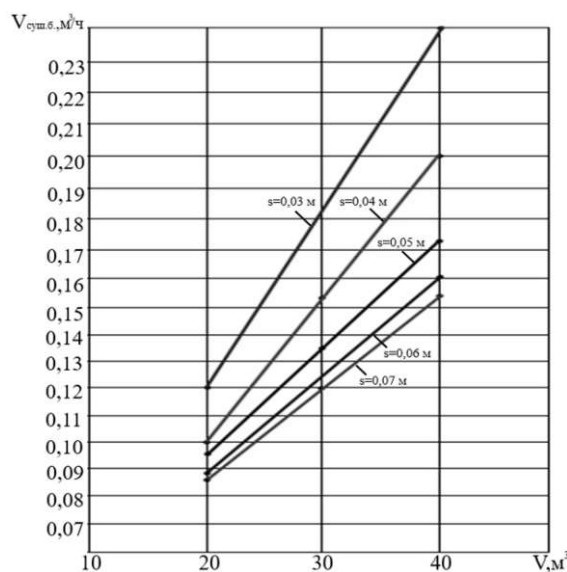


Рис.4. Зависимость объема сушильного бункера с древесными отходами от объема загрузки сушильной камеры и толщины пиломатериалов

Заключение

Для проведения анализа энергоэффективности процессов вакуумной сушки пиломатериалов был создан экспериментальный сушильный комплекс, состоящий из камеры сушки с СВЧ генератором и тепловым насосом, энергообеспечение которого осуществляется электрогенератором, работающим за счет выработки электроэнергии из предварительно подсушенных древесных отходов. В ходе проведенных расчетов было установлено, что преобразованные в электроэнергию измельченные древесные отходы позволяют полностью обеспечить работу электрогенератора, вырабатывающего энергетические ресурсы для агрегатов предложенной схемы СВЧ сушильного комплекса. По результатам реализации разработанной инженерной методики расчета оптимальных энергетических показателей основных элементов сушильной установки было выявлено, что увеличение толщины высушиваемых пиломатериалов приводит к снижению требуемой максимальной вырабатываемой мощности электрогенератора, что, в свою очередь, свидетельствует об эффективности предложенной схемы вакуумной СВЧ сушки в мобильных лесопильных комплексах, использование которых позволит снизить расходы при транспортировке леса.

Литература

1. Сафин Р.Р., Мухаметзянов Ш.Р. Исследование процессов вакуумной сушки пиломатериалов при конвективных методах подвода тепла // Деревообрабатывающая промышленность. 2012. №4. С. 20-24.
2. Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Гильмиев Р.Р., Валиев Ф.Г. Снижение расхода энергии на проведение процессов сушки древесины посредством вакуумно-конвективной технологии // Деревообрабатывающая промышленность. 2008. №5. С. 22-23.
3. Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Сафин Р.Г., Кайнов П.А. Новые подходы к совершенствованию вакуумно-конвективных технологий сушки древесины // Деревообрабатывающая промышленность. 2005. №5. С. 16.
4. Пат. № 2425305 Российская Федерация, МПК F26B5/04, F26B3/34. Способ сушки и термической обработки древесины / Сафин Р.Р., Сафин Р.Г., Разумов Е.Ю., Хасаншин Р.Р., Кайнов П.А., Кузьмин И.А., Мазохин М.А., Шайхутдинова А.Р., Ахтямова Т.Н., Воронин А.Е. – опубл. 27.07.2011.
5. Шагеева А.И., П.А. Кайнов, Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин. Математическое моделирование процессов СВЧ сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме // Деревообрабатывающая промышленность. 2022. №2. С.44-54.
6. Сафин Р.Р., Хакимзянов И.Ф., Кайнов П.А., Николаев А.Н., Сафина А.В. Обзор современных технологических решений повышения энергоэффективности в процессах сушки пиломатериалов // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т.17. №21. С. 50-52.

7. Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Хакимзянов И.Ф., Мухаметзянов Ш.Р., Кайнов П.А. Повышение энергоэффективности процесса осциллирующей вакуумно-кондуктивной сушки древесины путем использования теплового насоса // Инженерно-физический журнал. 2017. Т.90. №2. С. 334-341.
8. Сафин Р.Р., Мухаметзянов Ш.Р., Кайнов П.А., Шаяхметова А.Х. Методика расчета установки вакуумно-кондуктивной сушки пиломатериалов с использованием теплового насоса // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2015. Т.29. №2. С. 96-102.
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. Шагеева А.И., Сафин Р.Р., Мухаметзянов Ш.Р., Порфирьева К.М. Математическое моделирование процессов сушки пиломатериалов в СВЧ-среде // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2020. №57. С. 71-74.
13. Кайнов П.А., Мухаметзянов Ш.Р., Шамсутдинова А.И., Мухтарова А.Р. Математическая модель процесса сушки пиломатериала в вакуумной СВЧ установке // Деревообрабатывающая промышленность. 2017. №4. С. 17-21.

©Шагеева А.И. – аспирант кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: sham.adilya@yandex.ru; Кайнов П.А. – канд.техн.наук, доцент кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: petr.k@plastline.org; Сафин Р.Р. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: cfaby@mail.ru.

UDC 674.047.3

DEVELOPMENT OF AN EFFICIENT SCHEME OF ENERGY SUPPLY OF THE PROCESS OF VACUUM MICROWAVE DRYING OF LUMBER

A.I. Shageeva, Kainov P.A., R.R. Safin, R.R. Khasanshin

The article discusses ways to improve the energy efficiency of lumber drying processes in an electromagnetic environment. The developed energy-saving scheme for introducing the process of vacuum microwave drying in the mode of medium pressure oscillations is described. An engineering method for calculating the proposed scheme of a vacuum microwave dryer with a heat pump is presented. The power supply of this installation is proposed to be carried out by an electric generator operating by generating electricity from woodworking waste. The results of the analysis of the energy consumption of the units of the drying plant, depending on the volume of loading of dried lumber, are presented.

Keywords: drying chamber, microwave heating, oscillating mode, wood, vacuum pump, heat pump

References

1. Safin R.R., Mukhametzyanov Sh.R. [Investigation of the processes of vacuum drying of lumber with convective methods of heat supply] // Derevoobrabatyvayushaya promyshlennost' [Woodworking industry]. 2012. No. 4. pp. 20-24. (In Russ.)
2. Safin R.R., Khasanshin R.R., Gilmiev R.R., Valiev F.G. [Reducing energy consumption for wood drying processes by means of vacuum convective technology] // Derevoobrabatyvayushaya promyshlennost' [Woodworking industry]. 2008. No. 5. pp. 22-23. (In Russ.)
3. Safin R.R., Khasanshin R.R., Safin R.G., Kainov P.A. New approaches to improving vacuum-convective technologies for wood drying // Woodworking industry. 2005. No. 5. pp. 16. (In Russ.)

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. Мялицин

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