

МЕТОДИКА РАСЧЕТА УСТАНОВКИ ВАКУУМНО-КОНДУКТИВНОЙ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОВОГО НАСОСА

Р.Р. САФИН, *проф. каф. архитектуры и дизайна изделий из древесины КНИТУ, д-р техн. наук*,
Ш.Р. МУХАМЕТЗЯНОВ, *асп. каф. архитектуры и дизайна изделий из древесины КНИТУ*,
П.А. КАЙНОВ, *доц. каф. архитектуры и дизайна изделий из древесины КНИТУ, канд. техн. наук*,
А.Х. ШАЯХМЕТОВА, *асс. каф. архитектуры и дизайна изделий из древесины КНИТУ*.

joker775.87@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»
420015, Республика Татарстан, Казань, ул.К.Маркса, 68

В области энергосберегающих технологий применительно к процессам сушки в последние годы наибольшее внимание уделяется использованию альтернативных источников энергии, в частности, отходов деревообработки. В то же время, известные в других отраслях промышленности методы снижения энергетических затрат применительно к деревообрабатывающей промышленности до сих пор не нашли широкого использования и зачастую носят единичный характер. Так, например, используемые в конвективных сушилках тепловые насосы не получили дальнейшего развития и применения в других технологиях сушки. В связи с этим в статье представлены результаты исследований вакуум-осциллирующей кондуктивной сушки капиллярно-пористых коллоидных материалов в установке, состоящей из двух сушильных камер, в которых асинхронно чередуются стадии нагрева и вакуумирования. Принцип работы установки основан на передаче тепловой энергии испаренной в первой камере влаги обрабатываемому телу, находящемуся во второй камере, с помощью теплового насоса. При этом на процесс передачи тепловой энергии из одной камеры в другую с помощью теплового насоса затрачивается в несколько раз меньшее количество электроэнергии, чем величина передаваемой энергии, поэтому процесс прогрева пиломатериалов протекает при меньших энергозатратах. По результатам экспериментальных исследований была разработана математическая модель процесса вакуумно-осциллирующей кондуктивной сушки пиломатериалов с использованием В-плана факторного порядка с полными факторными планами, которые позволили определить исходные данные для инженерного метода расчета теплового насоса для предложенной конструкции установки. По представленной инженерной методике расчета была разработана энергосберегающая пилотная установка с тепловым насосом. Коэффициент преобразования электроэнергии для теплового насоса созданной пилотной установки $\mu_p = 5,28$, что подтверждает эффективность применения теплового насоса.

Ключевые слова: вакуум-осциллирующая сушка, пиломатериал, тепловой насос, контактная сушка.

Сушка является одной из самых энергоемких и ответственных операций деревообрабатывающей промышленности, поэтому уже многие десятилетия к этому процессу приковано особое внимание исследователей. Получать высокое качество высушенной древесины и сократить продолжительность процесса, позволяет техника сушки материалов, осуществляемая в условиях пониженного давления. Однако вакуумная сушка имеет проблему подвода тепловой энергии к материалу. Существующие в различных отраслях промышленности такие известные технологии, как СВЧ, ТВЧ, контактный метод и тепловое излучение, применительно к сушке древесины не всегда позволяют получить материал с заданным качеством и небольшими энергозатратами, особенно это касается пиломатериалов большого сечения или древесины ценных пород. При этом контактный способ, наряду с его основным недостатком (трудоемкость процесса), остается наиболее технически и

технологически простым методом подвода тепловой энергии в вакууме, поэтому пользуется наибольшей популярностью. Отсюда, исследования в области снижения энергозатрат и повышения качества вакуум-кондуктивной сушки носят актуальный характер [1].

В области энергосберегающих технологий применительно к процессам сушки в последние годы наибольшее внимание уделяется использованию альтернативных источников энергии, в частности отходов деревообработки. В то же время, известные в других отраслях промышленности методы снижения энергетических затрат применительно к деревообрабатывающей промышленности до сих пор не нашли широкого использования и зачастую носят единичный характер. Так, например, используемые в конвективных сушилках тепловые насосы не получили дальнейшего развития и применения в других технологиях сушки [2]. В связи с этим нами были проведены исследования вакуум-осциллирующей кондуктивной сушки

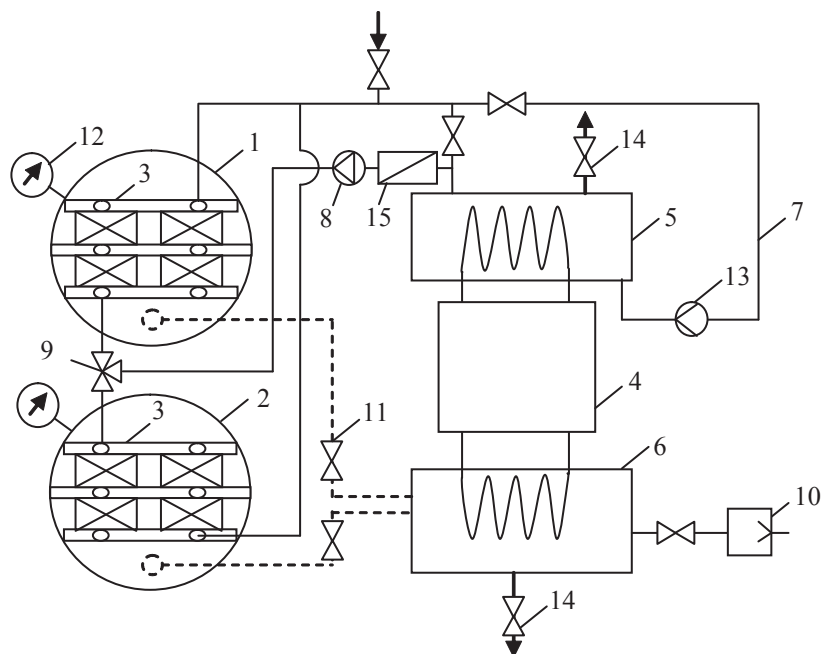


Рис. 1. Схема установки вакуум-осциллирующей сушки с тепловым насосом: 1 – первая камера сушки; 2 – вторая камера сушки; 3 – плиты с жидкостным нагревом; 4 – тепловой насос; 5 – конденсатор теплового насоса (теплопередача «фреон–жидкостной теплоноситель»); 6 – испаритель теплового насоса; 7 – жидкостной трубопровод; 8 – циркуляционный жидкостной насос; 9 – трехходовой кран; 10 – вакуумный насос; 11 – электромеханический клапан; 12 – вакуумметр; 13 – расходомер; 14 – вентиль; 15 – дополнительный электроподогреватель теплоносителя

Fig. 1. The installation scheme of a vacuum oscillating drying with a heat pump: 1 – first drying chamber; 2 – second drying chamber; 3 – Liquid heating plate; 4 – heat pump; 5 – condenser of the heat pump (heat transfer «Freon coolant liquid»); 6 – heat pump evaporator; 7 – liquid pipeline; 8 – liquid circulating pump; 9 – three-way valve; 10 – vacuum pump; 11 – electromechanical valve; 12 – vacuum gauge; 13 – flowmeter; 14 – valve; 15 – additional electric heater coolant

капиллярно-пористых коллоидных материалов в установке, состоящей из двух сушильных камер, в которых асинхронно чередуются стадии нагрева и вакуумирования.

Принцип работы установки основан на передаче тепловой энергии, испаренной в первой камере влаги, обрабатываемому телу, находящемуся во второй камере, с помощью теплового насоса. При этом на процесс передачи тепловой энергии из одной камеры в другую с помощью теплового насоса затрачивается в несколько раз меньшее количество электроэнергии, чем величина передаваемой энергии, поэтому процесс прогрева пиломатериалов протекает при меньших энергозатратах.

Экспериментальная установка (рис. 1) работает следующим образом. Исследуемые свежесрубленные образцы древесины укладываются в камерах сушки на нагревательных плитах. При этом с целью предотвращения интенсивного удаления влаги с торцов

древесины последние закрашиваются быстро сохнущей краской. Для замера температуры в центре образца в него вводят одну из хромель-копелевых термопар, другая регистрирует температуру поверхности материала [3, 4]. Далее камеры герметизируются с помощью крышек и, включением дополнительно электроподогревателя и циркуляции теплоносителя по малому кругу, начинается нагрев образца в верхней камере [5]. Прогрев древесины продолжается до тех пор, пока температура внутри образца не достигнет заданного значения. После прогрева верхняя камера подвергается вакуумированию и выдержке до остывания пиломатериала. При этом испаряющаяся из высушенного материала влага, конденсируясь на испарителе теплового насоса, отдает тепловую энергию хладагенту, за счет чего осуществляется стадия нагрева материала в нижней камере. Продолжительность стадии вакуумирования в первой камере определя-

Переменные факторы и уровни их варьирования
Variables and levels of variation

Наименование фактора	Обозначение		Интервал варьирования фактора	Уровень варьирования фактора		
	Натуральное	Нормализованное		Нижний (-1)	Основной (0)	Верхний (+1)
Температура обработки, °C	T	X_1	10	40	50	60
Остаточное давление, кПа	$P_{\text{ост}}$	X_2	20	20	40	60
Плотность пиломатериалов, кг/м ³	ρ	X_4	10	400	500	600
Толщина пиломатериалов, мм	S	X_5	15	20	35	50
Удаление связанной влаги						
Влажность пиломатериалов, %	W	X_3	10	10	20	30

ется продолжительностью нагрева материала во второй камере. Далее происходит одно-временная смена стадий в камерах. Сушку проводят до тех пор, пока влагосодержание пиломатериалов не достигнет заданного конечного значения [6].

Основным лимитирующим параметром в инженерной методике расчета основных узлов предложенной конструктивной схемы установки является поток испаряющейся из материала влаги, определяющий основные технологические параметры теплового насоса. В связи с этим была разработана математическая модель процесса вакуумно-кондуктивной сушки пиломатериалов с использованием В-плана второго порядка с полными факторными планами (ПФП) [7].

В целях повышения точности математического описания зависимость выходной величины (скорость сушки) от различных факторов целесообразно рассматривать в двух интервалах: сушке образца выше и ниже предела насыщения клеточных стенок [8]. Исследуемые факторы, их интервалы и уровни варьирования представлены в табл. 1.

На рис. 2 представлены экспериментально полученные кинетические зависимости температуры, давления и влажности материала в процессе сушки по режиму: нагрев образцов толщиной 20 мм до температуры 50°C и последующая выдержка в разрежен-

ной среде остаточным давлением 20 кПа и охлаждением материала до 40 °C.

По полученным кривым сушки были построены серии кривых скорости сушки в зависимости от температуры нагревательной плиты на стадии нагрева, остаточного давления в камере на стадии вакуумирования и толщины пиломатериала. Кривые скорости сушки для пиломатериалов, высушенных по вышеописанным режимам (рис. 2), представлены на рис. 3.

Далее по результатам исследований были получены уравнения регрессии, определяющие скорость сушки пиломатериалов [9]

– для первого периода сушки

$$N_1 = -0,06416W - 0,08354T + 0,006635P - 0,0000415TP - 0,000076PW + 0,00142TW + 3,7666,$$

– для второго периода сушки

$$N_2 = -0,001473W - 0,000341\rho - 0,001152S - 0,0000097TP - 0,00001875TW + 0,0000112TS + 0,0000187WS + 0,000018\rho S + 0,000077T_2 - 0,0000282P_2 + 0,00000067\rho_2 - 0,0000368S_2 + 0,303571.$$

Таким образом, экспериментальные исследования и математическое моделирование процесса вакуум-осциллирующей кондуктивной сушки позволяют определить исходные данные для инженерного метода расчета теплового насоса (ТН) для предложенной конструкции установки [10, 11]. Кроме того, данными для расчета являются:

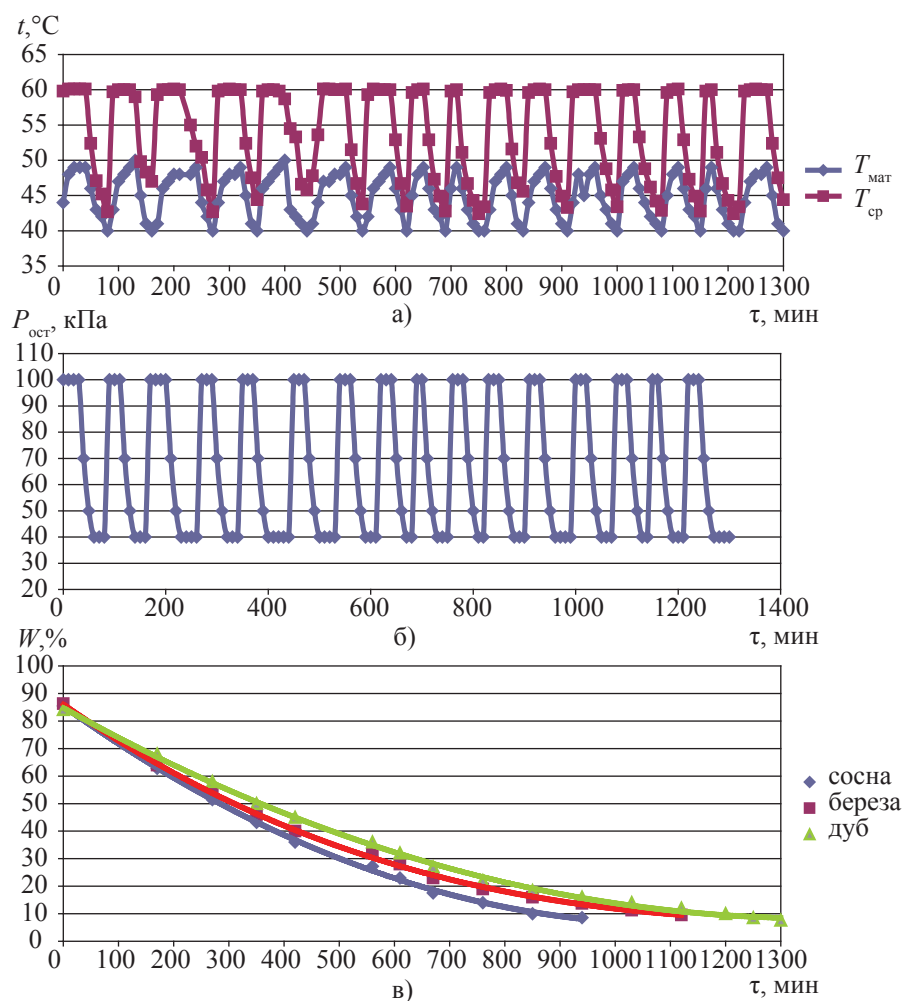


Рис. 2. Графики протекания процесса вакуум-осциллирующей сушки пиломатериалов: а – зависимость температуры от времени; б – зависимость остаточного давления от времени; в – кривая сушки пиломатериалов (сосна, береза, дуб)

Fig. 2. Graphs of the process of the oscillating vacuum drying lumber: а - temperature versus time; б - time course of the residual pressure; в - lumber drying curve (pine, birch, oak)

– тепловая нагрузка $Q_{\text{тн}}$ – определяется расходом испаренной влаги во время процесса выдержки пиломатериалов в процессе вакуумирования

$$Q_{\text{тн}} = N \cdot V_{\text{м}} \cdot \rho_{\text{м}} \cdot r,$$

где $V_{\text{м}}$ – объем материала;

$\rho_{\text{м}}$ – базисная плотность высушиваемого материала;

r – скрытая теплота парообразования.

– температура низкпотенциального теплоносителя на входе в испаритель – принимается равной температуре водяного пара, испаренного из материала и находящегося в свободном пространстве сушильной камеры (рис. 4) [12]

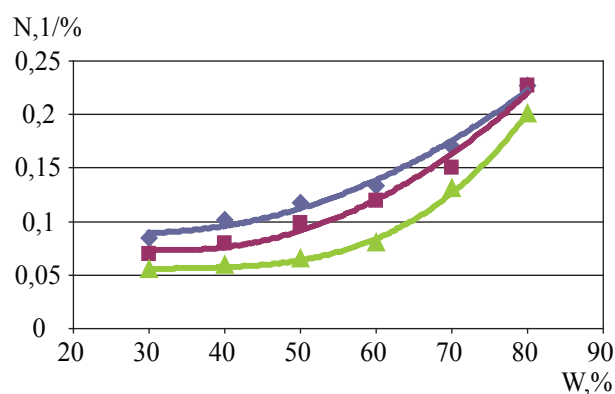


Рис. 3. График кривой скорости сушки (выше предела насыщения клеточных стенок)

Fig. 3. Schedule drying rate curve (above the saturation limit of the cell walls)

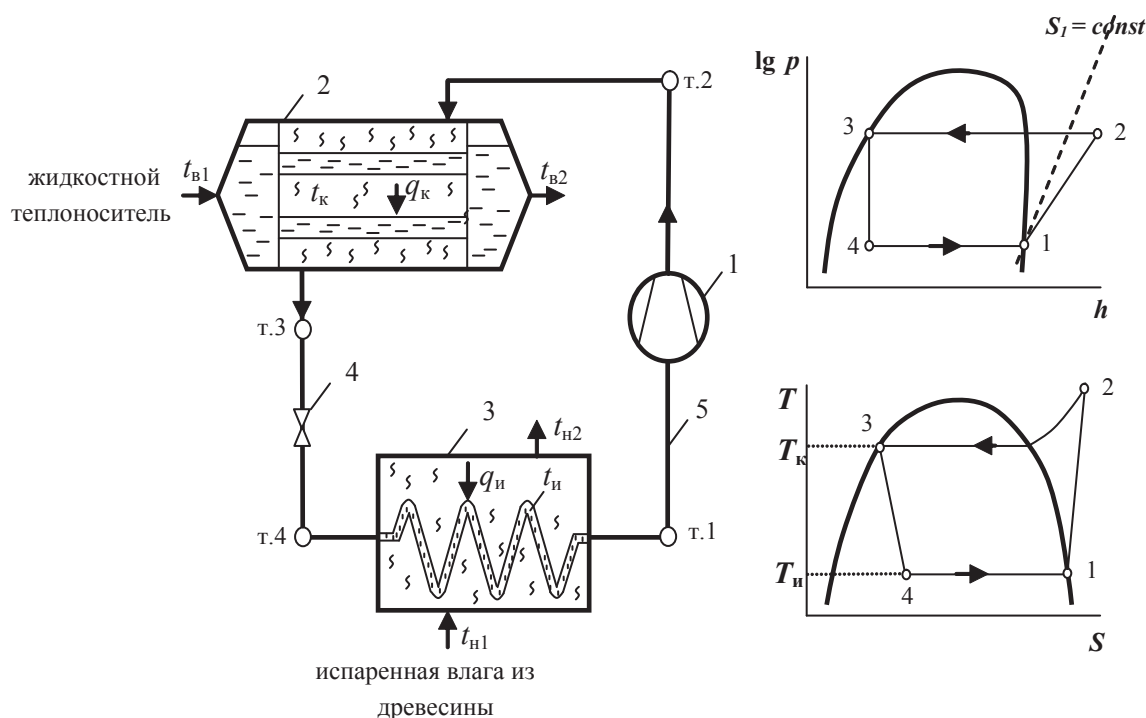


Рис. 4. Схема и цикл парокомпрессионного теплового насоса: $t_{в1}$, $t_{в2}$, $t_{н1}$, $t_{н2}$ – температуры высокопотенциального и низкопотенциального теплоносителя на входе и выходе; 1–т. 2 – необратимый политропный процесс сжатия паров хладагента в компрессоре; т. 2–т. 3 – изотермическая конденсация хладагента в конденсаторе и отдача теплоты высокопотенциальному теплоносителю; т. 3–т. 4 – необратимый адиабатический процесс расширения хладагента в дроссельном вентиле; т. 4–т. 1 – изотермическое испарение хладагента в испарителе за счет теплоты, отобранной у низкопотенциального теплоносителя

Fig. 4. Scheme and cycle of a vapor compression heat pump: $t_{в1}$, $t_{в2}$, $t_{н1}$, $t_{н2}$ – high-grade and low-grade is the temperature of the coolant at the inlet and outlet; т. 1–т. 2 – irreversible polytropic compression process vapor refrigerant in the compressor; т. 2–т. 3 – isothermal condensation of the refrigerant in the condenser and the return of high-grade heat transfer agent; т. 3–т. 4 – irreversible adiabatic expansion process of the refrigerant in the expansion valve; т. 4–т. 1 – isothermal evaporation of the refrigerant in the evaporator by the heat drawn from a low-grade coolant



Рис. 5. Пилотная вакуум-осциллирующая установка с тепловым насосом

Fig. 5. Pilot vacuum oscillating unit with heat pump

$$t_{н1} = t_{пара} = \frac{B}{A - \lg P} - C,$$

где A , B , C – константы уравнения Антуана.

– температура низкопотенциального теплоносителя $t_{н2}$ на выходе из испарителя – принимается равной температуре конденсата, образующегося в результате процесса конденсации водяного пара на поверхности испарителя – $2 \div 5^\circ\text{C}$.

– температура высокопотенциального теплоносителя (горячей воды) на входе в тепловой насос $t_{в1}$ и после теплового насоса $t_{в2}$, задается на 5 градусов соответственно выше или ниже температуры нагревательной плиты внутри камеры сушки, которая принимается при расчете необходимой скорости сушки материала

$$t_{в2} = t_{пл} + 5; t_{в1} = t_{пл} - 5,$$

– температура окружающей среды t_0 ;
– перепады температуры на выходе из теплообменников (обычно 3–5°C) в испарителе Δt_n , конденсаторе Δt_k .

Дальнейший порядок расчета теплового насоса осуществляется по стандартным методикам термодинамических расчетов подобных процессов [13, 14].

По предложенной инженерной методике расчета вакуум-осциллирующей кондуктивной сушики была разработана пилотная установка с применением теплового насоса, представленная на рис. 5.

Основные узлы созданной установки:

– компрессор для рабочего хладагента R22 теплопроизводительностью 625 Вт;

– конденсатор – кожухотрубчатый теплообменник для нагрева жидкостного агента сушики поверхностью теплообмена 3 м²;

– испаритель – кожухотрубчатый теплообменник для конденсации испаренной во время сушики пиломатериала влаги поверхностью теплообмена 1,3 м²;

– вакуумный насос производительностью откачки 4,9 м³/сек;

– циркуляционный насос для доставки нагретой жидкости от теплового насоса к нагревательным плитам производительностью 3 м³/ч;

– вакуумный затвор между камерой и испарителем проводимостью 180 л/сек.

Отношение потребленной электроэнергии к полученной теплоте является показателем эффективности насоса μ . Коэффициент преобразования электроэнергии μ (Coefficient of Performance или COP) – отношение теплоты, переданной горячему теплоносителю к электроэнергии, подведенной к приводу–электродвигателю компрессора, по отношению к коэффициенту μ дополнительно включает механические потери энергии в компрессоре и потери энергии в электродвигателе

$$\mu_3 = q_{mn} / W = \eta_{э.м.} \eta_3 \mu,$$

где $\eta_{э.м.}$ – электромеханический КПД компрессора, обычно равен 0,9–0,95,

η_3 – КПД электродвигателя, равен 0,6–0,95.

Эффективность работы ТН с электроприводом определяется выполнением условия $\mu_3 > 1$. Если эта величина равна 1, то теплота, вырабатываемая ТН, становится равной теп-

лоте, полученной при прямом использовании электроэнергии на сушку, и применение теплового насоса теряет смысл. Коэффициент преобразования электроэнергии для теплового насоса созданной пилотной установки $\mu_3 = 5,28$, что подтверждает эффективность применения ТН.

Библиографический список

1. Сафин, Р.Р. Вакуумно-кондуктивная сушка пиломатериалов: монография / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Е.Ю. Разумов. Казань: КГТУ – 2009.
2. Мухаметзянов, Ш.Р. Исследования вакуумно-осциллирующей сушики пиломатериалов с тепловым насосом // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 6. – С. 173–175.
3. Сафин, Р.Р. Технологические режимы вакуумной сушики пиломатериалов при конвективных методах подвода тепла / Р.Р. Сафин // Деревообрабатывающая пром-сть. – 2012. – № 3. – С. 68–70.
4. Сафин, Р.Р. Исследование вакуумно-кондуктивного термомодифицирования древесины / Р.Р. Сафин // Деревообрабатывающая промышленность. – 2009. – № 3. – С. 24.
5. Мухаметзянов, Ш.Р. Вакуумно-осциллирующая сушка с использованием теплового насоса / Ш.Р. Мухаметзянов, Р.Р. Сафин // Деревообр. пром-сть. – 2013. – № 1. – С. 26–29.
6. Хасаншин, Р.Р. Исследование режимов сушики в вакуум-осциллирующей установке / Ш.Р. Мухаметзянов, Р.Р. Хасаншин // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 6. – С. 207–210.
7. Пижурич, А. А. Основы моделирования и оптимизации процессов деревообработки / А.А. Пижурич, М.С. Розенбит – М.: Лесная пром-сть., 1988. – 294 с.
8. Сафин, Р.Р. Новые подходы к совершенствованию вакуумно-конвективных технологий сушики древесины / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, П.А. Кайнов // Деревообрабатывающая пром-сть. – 2005. – № 5. – С. 16.
9. Сафин, Р.Р. Математическая модель конвективной сушики коллоидных капиллярно-пористых материалов при давлении ниже атмосферного / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Р.Г. Сафин // Вестник Казанского технологического университета. – 2005. – № 1. – С. 266.
10. Сафин, Р.Р. Исследование вакуумно-кондуктивного процесса модифицирующей термообработки древесины / Р.Р. Сафин, Е.Ю. Разумов, М.К. Герасимов, Д.А. Ахметова // Деревообрабатывающая пром-сть. – 2009. – № 3. – С. 9.
11. Сафин, Р.Р. Экспериментальные исследования осциллирующей сушики древесины в гидрофильных жидкостях / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Н.Р. Галяветдинов, Ф.Г. Валиев // Изв. вузов. Серия: Химия и химическая технология. – 2008. – Т. 51 – № 12. – С. 104–106.
12. Сафин, Р.Р. Математическая модель процесса конвективной сушики пиломатериалов в разреженной среде / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Р.Г. Сафин // Известия вузов. Лесной журнал. – 2006. – № 4. – С. 64–71.
13. Быков, А.В. Холодильные машины и тепловые насосы / А.В. Быков, И.М. Калнинь, А.С. Крузе. – М.: Агропромиздат, 1988. – 287 с.
14. Данилова, Г.Н. Теплообменные аппараты холодильных установок / Г.Н. Данилова и др. – Л.: Машиностроение, 1973. – 328 с.

METHOD OF CALCULATING THE PROCESS OF VACUUM- CONDUCTIVE LUMBER DRYING WITH HEAT PUMP

Safin R.R., Prof. KNRTU, Dr.Sci. (Tech.); Mukhametzyanov Sh.R., gr. KNRTU; Kainov P.A., Assoc. Prof. KNRTU, Ph.D (Tech.); Shayahmetova A.H., assistant KNRTU

joker775.87@mail.ru

Kazan National Research Technological University, 68, Karl Marx street, Kazan, Republic of Tatarstan, 420015, Russia

In the recent years much attention has been drawn to the use of the alternative energy sources, in particular waste wood, in the field of the energy-saving technologies applied to the drying processes. At the same time, the methods of reducing of the energy costs widely used in other industries, are still not widespread and applied in the woodworking industry. Thus, the heat pumps used in the convective drying plants have not been used further in other drying technologies. Thus, the results of research of the vacuum-oscillating conductive drying of capillary-porous colloidal materials in the plant consisting of the two drying chambers in which stages of heating and degassing are asynchronously alternated are presented in the given article. The principle of work of the plant is based on the transfer of the heat energy appearing as the result of evaporation of the moisture in the first chamber to the processed object, located in the second chamber, with the help of a heat pump. The process spends several times less electricity than the amount of transmitted energy, as the process of lumber heating flows with the lower energy consumption. A mathematical model of the oscillating conductive vacuum drying of lumber with the use of B-plan of the second order with full factorial plan has been developed according to the results of experimental studies. It allowed to establish baseline data for the engineering method for choosing the heat pump for the proposed construction of the plant. The energy-saving pilot plant with a heat pump has been developed by the presented engineering calculation method. The coefficient of performance for the heat pump of the developed pilot plant $\mu_s = 5,28$, which is confirmed by the effectiveness of the use of the heat pump.

Keywords: vacuum-oscillating drying, lumber, heat pump, contact drying.

References

1. Safin R.R., Khasanshin R.R., Razumov E.Yu. *Vakuumno-konduktivnaya sushka pilomaterialov* [Vacuum-conductive drying of lumber: Monograph]; Federal agency of education, state educational institution of high school education «Kazan state technological university». Kazan, 2009.
2. Mukhametzyanov Sh.R. *Issledovaniya vakuumno-ostsilliruyushchey sushki pilomaterialov s teplovym nasosom* [Studies vacuum oscillating lumber drying with heat pump] Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Herald of Kazan state technological university]. 2013. T. 16. № 6. pp. 173-175.
3. Safin R.R. *Tekhnologicheskie rezhimy vakuumnoy sushki pilomaterialov pri konvektivnykh metodakh podvoda tepla* [Technological modes of vacuum drying of lumber with convective heat input methods] Wood industry. 2012. № 3. pp. 68-70.
4. Safin R.R. *Issledovanie vakuumno-konduktivnogo termomodifitsirovaniya drevesiny* [The study of vacuum-conductive thermomodification timber]. Wood industry. 2009. № 3. p. 24.
5. Mukhametzyanov Sh.R., Safin R.R. *Vakuumno-ostsilliruyushchaya sushka s ispol'zovaniem teplovogo nasosa* [Vacuum-oscillating drying with heat pump]. Wood industry. 2013. № 1. pp. 26-29.
6. Khasanshin R.R., Mukhametzyanov Sh.R. *Issledovanie rezhimov sushki v vakuum-ostsilliruyushchey ustanovke* [Research modes of drying in a vacuum-oscillating installation], Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Herald of Kazan state technological university]. 2011. № 6. pp. 207-210.
7. Pizhurin A.A., Rozenblit M.S. *Osnovy modelirovaniya i optimizatsii protsessov derevoobrabotki* [Fundamentals of modeling and optimization of processes woodworking]. Moscow: Lesnaya prom-st' [Forest industry]. 1988. 294 p.
8. Safin R.R., Khasanshin R.R., Kaynov P.A. *Novye podkhody k sovershenstvovaniyu vakuumno-konvektivnykh tekhnologiy sushki drevesiny* [New approaches to improve the vacuum- convective drying of wood technology]. Wood industry. 2005. № 5. p. 16.
9. Safin R.R., Khasanshin R.R., Safin R.G. *Matematicheskaya model' konvektivnoy sushki kolloidnykh kapillyarno-poristykh materialov pri davlennii nizhe atmosfernogo* [A mathematical model of convective drying of colloidal capillary- porous materials at sub-atmospheric pressure] Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Herald of Kazan state technological university]. 2005. № 1. p. 266.
10. Safin R.R., Razumov E.Yu., Gerasimov M.K., Akhmetova D.A. *Issledovanie vakuumno-konduktivnogo protsessa modifitsiruyushchey termoobrabotki drevesiny* [The study of vacuum- conductive process of modifying the heat treatment of wood]. Wood industry. 2009. № 3. p. 9.
11. Safin R.R., Khasanshin R.R., Galyavetdinov N.R., Valiev F.G. *Eksperimental'nye issledovaniya ostsilliruyushchey sushki drevesiny v gidrofil'nykh zhidkostyakh* [Experimental studies of oscillating drying wood in hydrophilic liquids] News of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology. 2008. T. 51 № 12. pp. 104-106.
12. Safin R.R., Khasanshin R.R., Safin R.G. *Matematicheskaya model' protsessa konvektivnoy sushki pilomaterialov v razryazhennoy srede* [A mathematical model of the process of convective drying of lumber in a rarefied environment] News of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology. 2006. № 4. pp. 64-71.
13. Bykov A.V., Kalnin' I.M., Kruze A.S. *Kholodil'nye mashiny i teplovye nasosy* [Chillers and heat pumps]. Moscow: Agropromizdat [Agroindustry publishing], 1988. 287 p.
14. Danilova G.N. *Teploobmennye apparaty kholodil'nykh ustanovok* [Heat exchangers of chillers]. Mashinostroenie [Mechanical Engineering], 1973. 328 p.