

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВАКУУМНОЙ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ ПРИ КОНВЕКТИВНЫХ МЕТОДАХ ПОДВОДА ТЕПЛА

Р.Р. Сафин, Ш.Р. Мухаметзянов

Предложена технология вакуум-осциллирующей сушки пиломатериалов, на стадии прогрева которой использован перегретый пар с целью интенсификации теплообменных процессов и релаксации сушильных напряжений. Приведены результаты математического моделирования, которые могут быть использованы при выдаче рекомендаций по режимным параметрам процесса.

Ключевые слова: сушка, вакуум, древесина

The technology of the oscillating vacuum lumber drying, heating stage at which the superheated steam is used to intensify the heat transfer processes and relaxation drying stresses. The results of mathematical modeling, which can be used for making recommendations on operational parameters of the process.

Keywords: drying, vacuum, wood

В последние годы деревообрабатывающая промышленность претерпевает существенные изменения, влекущие за собой переход на качественно новый уровень работы на рынке мебели и столярных изделий. На отечественный рынок поступает зарубежная высококонкурентная продукция, заставляя предприятия страны повышать качество изделий, в связи с этим встает вопрос переоснащения производственных мощностей. При этом одним из основных технологических процессов, оказывающих влияние на качество, себестоимость продукции и продолжительность производственного цикла, на деревообрабатывающих предприятиях является сушка древесины.

Проведенный литературный анализ показал, что наиболее перспективными в области сушки древесины являются, вакуумно-конвективные технологии, сушильный процесс в которых складывается из последовательно чередующихся стадий нагрева древесины и вакуумирования [1, 2]. Однако в существующих вакуум-конвективных камерах на стадии прогрева применяется горячий воздух, который приводит к удалению влаги с поверхностных слоев в процессе прогрева древесины, как следствие, снижению качества пиломатериала. Поэтому в данных типах сушилок требуется строгое регулирование влагосодержания среды. В то же время известно, что использование перегретого пара на стадии прогрева упрощает управление сушильной установкой и интенсифицирует стадию прогрева, одновременно выполняя роль промежуточной влаготеплообработки.

В связи с этим нами был предложен вакуум-осциллирующий способ сушки пиломатериалов в среде перегретого пара. Процесс сушки целесообразно начинать с откачки инертного газа из рабочей полости аппарата (см. рис. 1), что приводит к отсутствию фазового сопротивления и интенсификации процесса прогрева.

После создания вакуума начинается стадия прогрева, которую можно разделить на два периода:

1. прогрева материала при наличии фазовых переходов теплоносителя;
2. конвективного прогрева материала в среде перегретого пара.

Первый период начинается в момент подачи пара из парогенератора в камеру сушки и характеризуется конденсацией пара на холодной поверхности материала, вследствие чего начинается общий прогрев и увлажнение пиломатериала. Несконденсировавшаяся часть пара идет на создание паровой среды.

Материальный баланс по пару в этом случае можно представить в следующем виде

$$dm_g = dm_n + dm_k, \quad (1)$$

где количество пара, поступающего в камеру, за бесконечно малый промежуток времени определяется из соотношения

$$dm_g = \mu' \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \times \sqrt{\frac{2k'}{k'+1} \cdot \rho_{n2} \cdot P_{n2} \cdot \left[\left(\frac{P_n}{P_{n2}} \right)^{\frac{2}{k'}} - \left(\frac{P_n}{P_{n2}} \right)^{\frac{k'+1}{k'}} \right]} d\tau \quad (2)$$

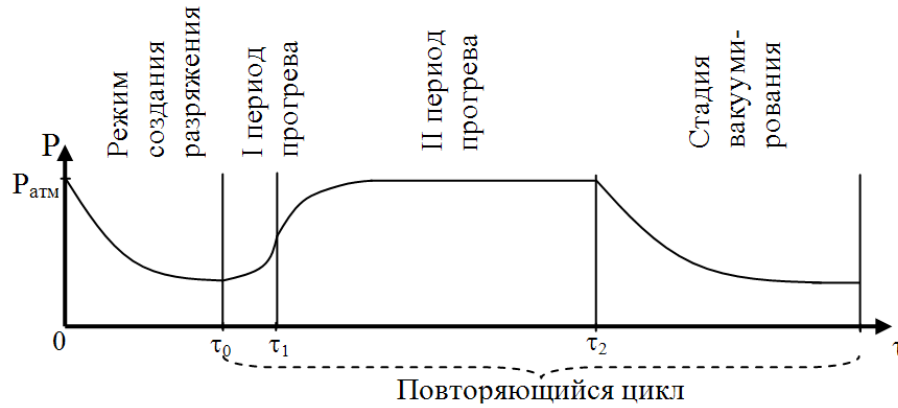


Рис. 1. Схема ведения вакуум-осциллирующей сушки пиломатериалов в среде перегретого пара

Выражение для определения количества пара, поступающего на повышение давления среды в свободном пространстве камеры сушки, имеет вид

$$dm_n = \frac{\mu \cdot V_{св}}{R} \cdot \frac{T \cdot dP - P \cdot dT}{T^2}. \quad (3)$$

Пар, конденсирующийся на поверхности пиломатериала dm_k , вызывает его прогрев и частичное увлажнение. Для описания тепломассопереноса внутри пиломатериала воспользуемся дифференциальными уравнениями А.В. Лыкова [3], которые применительно к одномерной симметричной пластине и для однокомпонентной жидкости можно записать в виде

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \cdot \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right) + a_m \cdot \delta \cdot \left(\frac{\partial^2 T_M}{\partial x^2} \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_M}{\partial \tau} = a_m \cdot \left(\frac{\partial^2 T_M}{\partial x^2} \right) + \varepsilon \cdot \frac{r}{c_m} \cdot \frac{\partial U}{\partial \tau}. \quad (5)$$

При отсутствии фазовых превращений внутри пластины в уравнении (5) критерий парообразования ε равен нулю. Тогда, дифференциальное уравнение сводится к уравнению теплопроводности Фурье

$$\frac{\partial T_M}{\partial \tau} = a_m \cdot \left(\frac{\partial^2 T_M}{\partial x^2} \right). \quad (6)$$

Расчет системы уравнений (3), (5) проводится при следующих краевых условиях

$$\frac{r \cdot dm_k}{F \cdot d\tau} = -\lambda \cdot \frac{\partial T_M}{\partial x} \Big|_{x=0}, \quad (7)$$

$$U(0; x) = U_0, \quad (8)$$

$$T_M(0; x) = T_{M.0}. \quad (9)$$

Выражение для влажности поверхности пиломатериала вытекает из условия максимально возможного влагосодержания данной породы

древесины [4]

$$U_{нов} = \frac{(\rho_{д.в} - \rho_{\delta}) \cdot \rho_{ж}}{\rho_{д.в} \cdot \rho_{\delta}}. \quad (10)$$

После подачи в сушильную камеру определенной порции водяного пара начинается второй период прогрева материала. Для чего прекращается подача пара в камеру, в работе остаются калориферы и вентилятор для принудительного движения паровой среды. При этом наряду с переносом влаги внутрь древесины наблюдается снижение влагосодержания поверхности пиломатериала.

Прогрев материала в условиях вынужденного движения перегретого пара описывается системой уравнений (3), (5) при начальных условиях, представляющих собой поля температур и влажности по сечению материала после I периода стадии прогрева; граничные условия записываются выражениями

$$\alpha \cdot (T_n - T_{нов}) - j_{нов} \cdot r = -\lambda \frac{\partial T_M}{\partial x} \Big|_{x=0}, \quad (11)$$

$$j_{нов} - \beta \cdot (\rho_{нов} - \rho) = 0, \quad (12)$$

при этом поток влаги к поверхности массообмена определяется соотношением

$$j_{нов} = \rho_0 \cdot \left(a_m \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} + a_m \cdot \delta \cdot \frac{\partial T_M}{\partial x} \Big|_{x=0} \right) \quad (13)$$

Давление паровой среды в камере с достаточной для инженерных расчетов точностью может быть определено из уравнения Менделеева-Клапейрона

$$P = \frac{(m_n + m_{с.м} \cdot \Delta \bar{U}) \cdot R \cdot T}{\mu \cdot V_{св}}. \quad (14)$$

После прогрева пиломатериала включением конденсатора начинается стадия вакуумирования.

Стадию вакуумирования также можно подразделить на два периода: процесс понижения давления и выдержка нагретого материала в условиях вакуума; □

Интенсивности изменения давления и температуры паровой среды в процессе понижения давления определяются из выражений

$$\frac{dP}{d\tau} = \frac{F \cdot R \cdot T}{V_{св} \cdot \mu} \cdot j_{нов} - P \cdot \left(\frac{Q_{с.п}}{V_{св}} - \frac{1}{T} \cdot \frac{dT}{d\tau} \right), \quad (15)$$

$$\frac{dT}{d\tau} = \left[\frac{\alpha \cdot F \cdot R \cdot (T_{м.нов} - T)}{P \cdot \mu \cdot c \cdot V_{св}} - \frac{Q_{с.п}}{V_{св}} + \frac{F \cdot R \cdot T \cdot j}{V_{св} \cdot P \cdot \mu} \right] \cdot T. \quad (16)$$

Вследствие того, что в рабочей полости аппарата отсутствует инертный газ и имеются лишь водяные пары, фигурирующая в уравнениях (12), (13) объемная производительность системы удаления пара $Q_{с.п}$ будет равна объемной производительности конденсатора.

После создания в камере рабочего вакуума, материал еще сохраняет тепловую энергию достаточную для удаления влаги, поэтому высушиваемый пиломатериал выдерживается при остаточном давлении до снижения температуры в центре материала до некоторого значения. Тепломассоперенос в пиломатериале на стадии вакуумирования также описывается дифференциальными уравнениями Лыкова. Начальные условия представляют собой поля температур и влажности по сечению материала после стадии прогрева пиломатериала в среде перегретого пара. Граничные условия записываются в виде выражений

$$U_{нов} = a \cdot \left(\frac{P}{P_{нас}} \right)^n \quad (18)$$

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T_m}{\partial x} \Big|_{x=0} = j_{нов} \cdot r + T_{м.нов} \cdot c \cdot j_{нов} + \alpha \cdot (T_{м.нов} - T) \quad (19)$$

После завершения стадии вакуумирования цикл «прогрев-вакуум» повторяется. Количество циклов определяется толщиной пиломатериала, начальной и конечной влажностью и породой древесины.

Для проверки разработанной математической модели на адекватность была создана экспериментальная установка [5, 6]. В качестве модельного материала для математических расчетов и экспериментальных исследований кинетики сушки была выбрана древесина березы бородавчатой, в связи с наличием в справочной литера-

туре наиболее полных сведений о теплофизических и физико-механических свойствах данной породы.

Проверка модели на адекватность производилась на основе стандартной статистической обработки. Количественная оценка расхождения расчетных и экспериментальных значений находится в пределах 18 %, что позволяет сделать вывод о возможности использования модели для теоретического исследования вакуум-осциллирующего способа сушки пиломатериалов.

С целью выдачи рекомендаций по режимам вакуум-осциллирующей сушки было проведено моделирование процесса, которое показало:

1. Продолжительность прогрева снижается с повышением количества водяного пара в камере сушки, что объясняется интенсивным прогревом материала за счет конденсации (рис. 2).

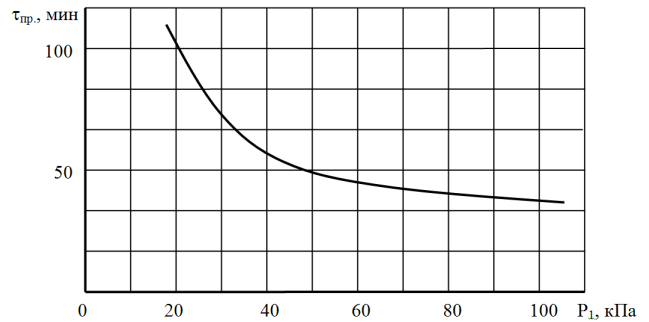


Рис. 2. Зависимость продолжительности стадии прогрева от давления в камере после первого периода

Поэтому, с одной стороны, целесообразным является максимально возможное повышение давления в камере в первом периоде прогрева. Однако, с другой стороны, чрезмерное увеличение количества влаги в аппарате приводит к значительному увлажнению материала в процессе прогрева и, как следствие, снижает величину влагосъема за один цикл сушки (рис. 3).

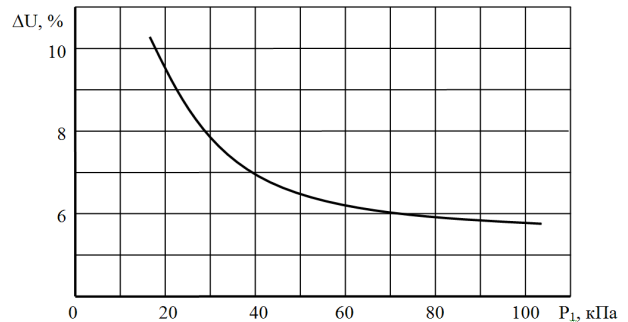


Рис. 3. Зависимость величины влагосъема за один цикл от давления в камере после первого периода

Вследствие чего, была определена величина давления среды в первом периоде в зависимости от влагосодержания высушиваемой древесины (рис. 4). Таким образом, для создания максимального влагосъема при минимальной продолжительности стадии прогрева древесины необходимо задаваться новой величиной давления P_1 , зависящей от влагосодержания образца. Так, при высокой начальной влажности древесины, когда капилляры практически полностью заполнены свободной влагой и дальнейшее увлажнение не приведет к значительному повышению влагосодержания прогрев древесины целесообразно проводить увеличивая продолжительность первого периода прогрева. При дальнейшем процессе сушки, когда влагосодержание материала падает, на первый план выходит прогрев в среде перегретого пара.

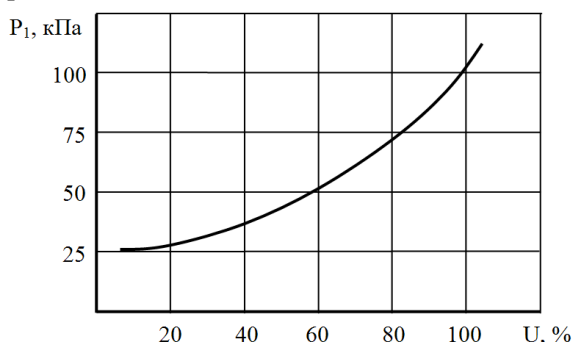


Рис. 4. Зависимость давления в первом периоде от величины интегрального влагосодержания пиломатериала в начале цикла «прогрев – вакуум»

2. Второй период прогрева целесообразно вести при высокой температуре перегретого пара (рис. 5), ограниченной предельной величиной градиента влажности и значением температуры, оказывающим негативное влияние на физико-механические свойства древесины.

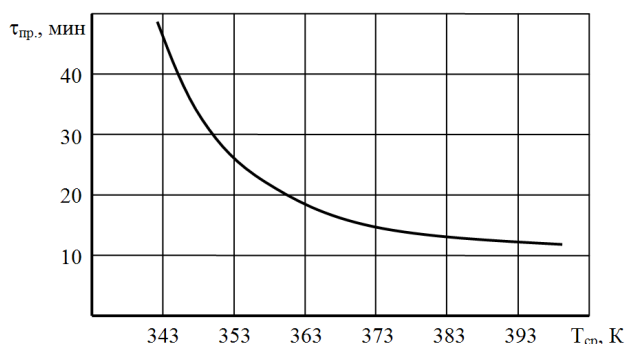


Рис. 5. Зависимость времени повышения температуры в центре пиломатериала (при $S = 40$ мм) на 20 К от температуры среды во втором периоде прогрева

3. Моделирование стадии вакуумирования показало, что величина влагосъема зависит от

остаточного давления в камере. Из рис. 6 видно, что величина влагосъема с березового пиломатериала влагосодержанием 70 % и температурой 373 К с ростом остаточного давления снижается.

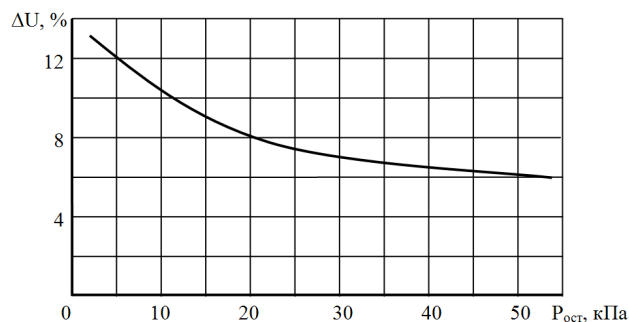


Рис. 6. Зависимость величины влагосъема от остаточного давления в камере

4. Для определения рациональной продолжительности стадии вакуумирования была исследована зависимость длительности процесса сушки березового пиломатериала до влажности $U_{кон} = 12$ % от остаточного градиента температуры, до которой выдерживался материал при пониженном давлении. Полученная зависимость представлена на рис. 7. Из графика видно, что выдержка под вакуумом целесообразна до значения градиента температуры равного 1,2 – 1,3 К/мм, дальнейшая выдержка увеличивает продолжительность процесса сушки.

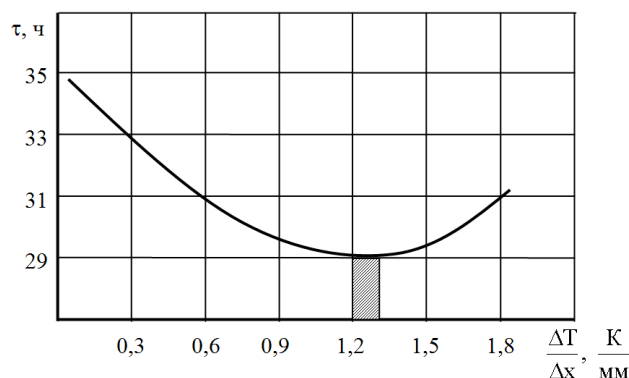


Рис. 7. Зависимость продолжительности процесса сушки от конечной величины перепада температуры по толщине образца

Результаты математического моделирования могут быть использованы при выдаче рекомендаций по режимным параметрам процесса вакуум-осциллирующей сушки пиломатериалов.

На основе аналитического и патентного исследования была разработана сушильная установка для реализации предлагаемого способа сушки. Проведенный технико-экономический анализ подтвердил эффективность созданного

аппарата для сушки твердых пород древесины по сравнению с традиционными конвективными способами, вследствие сокращения длительности процесса более чем в 4 раза без ущерба качеству высушиваемой древесины.

Условные обозначения

T – температура, К; P – давление, Па; m – масса, кг; V – объем, m^3 ; ρ – плотность, kg/m^3 ; U – влагосодержание материала, kg/kg ; W – влажность материала, %; μ – молекулярная масса, $kg/kmol$; c – удельная теплоемкость, $Дж/(кг \cdot К)$; g – скрытая теплота парообразования, $Дж/кг$; ε – критерий парообразования; R – универсальная газовая постоянная, $Дж/(кмоль \cdot К)$; a , n – коэффициенты в уравнении изотермы Фрейндлиха; λ – коэффициент теплопроводности, $Дж/(м \cdot с \cdot К)$; a_t – коэффициент температуропроводности, m^2/c ; a_m – коэффициент массопроводности, m^2/c ; δ – относительный термоградиентный коэффициент, $1/K$; α – коэффициент теплоотдачи, $Дж/(m^2 \cdot с \cdot К)$; β – коэффициент массоотдачи, m/c ; τ – текущее время, с; F – площадь поверхности пиломатериалов; j – поток массы, $kg/(m^2 \cdot с)$; $\Delta \bar{U}$ – изменение интегрального влагосодержания материала, kg/kg . Индексы: в – пар, поступающий в камеру из парогенератора; п – пар; ср – среда; к – пар, конденсирующийся на поверхности пиломатериалов; пг – парогенератор; м – материал; с.м – сухой материал; пов – поверхность; св – свобод-

ный; б – базисная; дв – древесинное вещество; 1 – состояние после первого периода прогрева.

Список литературы

1. Кришер О. Научные основы техники сушки: учеб. пособие. М.: Иностранная литература, 1961. 232 с.
2. Расев А.И. Конвективно-вакуумная сушилка для пиломатериалов / А.И. Расев, Д.М. Олексив // Деревообрабатывающая промышленность. 1993. № 4. С. 9-10.
3. Лыков М.В. Теория сушки: учеб. пособие. М.: Наука, 1968. 472 с.
4. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине. М.: Лесн. пром-ть, 1989. 296 с.
5. Сафин Р.Р. Экспериментальные исследования в области вакуум-конвективной сушки пиломатериалов / Р.Р. Сафин, В.А. Лашков, Р.Г. Сафин, Л.Г. Голубев // Тезисы докладов международной научно-практической конференции «Химико-лесной комплекс – научное и кадровое обеспечение в XXI веке. Проблемы и решения», 2000. С. 110-111.
6. Сафин Р.Р. Исследование конвективной сушки пиломатериалов при стационарном пониженном давлении / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Р.Г. Сафин, Е.К. Воронин // Труды IV Международного симпозиума «Строение, свойства и качество древесины», 2004. С. 523 – 526.

Р.Р. Сафин – д-р техн. наук, проф., зав. каф. архитектуры и дизайна изделий из древесины Казанского национального исследовательского технологического университета, cfaby@mail.ru; **Ш.Р. Мухаметзянов** – инженер ООО «НПП «Термотехнологии», г. Казань.