

ВЛАГОПЕРЕНОС В ЛИСТВЕННИЧНЫХ ПИЛОМАТЕРИАЛАХ ПРИ СУШКЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ РЕЖИМАМИ

Введение. Современная теория конвективной сушки, основанная на капиллярных явлениях, позволила сформулировать основные положения влагопереноса в пиломатериалах при конвективном подводе тепловой энергии [1], [2] и др. Предполагается, что влага по толщине доски в процессе конвективной сушки перераспределяется под действием градиента влагосодержания в направлении понижающейся влажности; по действием градиента температуры – в направлении понижающейся температуры.

Тогда плотность потока влаги является результатом действия трёх градиентов [1]:

$$i = -a' \cdot \rho_0 \cdot \left(\frac{du}{dx} + \delta \frac{dt}{dx} \right), \quad (1)$$

где a' – коэффициент влагопроводности (аналог коэффициенту температуропроводности); ρ_0 – плотность вещества в абсолютно сухом состоянии; du/dx – градиент влагосодержания; δ – термоградиентный коэффициент; dt/dx – градиент температуры.

Представляя древесину как капиллярно-пористое коллоидное тело, удалось решить ряд принципиальных задач по влагопереносу в пиломатериалах при конвективной сушке. В основу процессов переноса был заложен первый закон Фика, где движущей силой влаги является градиент влагосодержания. Предполагая, что процесс влагопереноса в древесине осуществляется в неизотермических условиях, в уравнении (1) предусмотрена поправка в виде второго слагаемого.

Преимущества и недостатки такого подхода к решению влагопереноса в древесине при сушке рассмотрены в специальной литературе [3]. Поэтому в данной статье уделять внимание этому не будем. При этом, концентрируя основное внимание на капиллярных явлениях, на наш взгляд, не учитывается ряд факторов, без которых достаточно сложно объяснить возникновение в процессе сушки некоторых специфических явлений. К таким явлениям относятся: значительное увеличение времени сушки пихтовых пиломатериалов по сравнению с сосновыми, что противоречит выполнению условий уравнения (1), образование так называемого «водослоя» в пиломатериалах независимо от породы древесины (таблица 1).

В таблице 1 приведены результаты исследования партии высушенных пиломатериалов из древесины лиственницы. Данные показали, что за 350 часов сушки влажность в доске снизилась только на 20 %. При этом перепад влажности по сечению доски в смежных точках достигает 20 %. Такое распределение влажности встречается в 50 ... 80 % лиственничных пиломатериалов, прошедших камерную сушку. Всё вышесказанное указывает на нереализованный потенциал движущей силы в виде градиентов влагосодержания и температуры.

Из проведённых исследований видно, что требуется предусмотреть дополнительные факторы, которые позволят уточнить процессы, посредством которых осуществляется перенос влаги в пиломатериалах на примере лиственницы сибирской (в дальнейшем – лиственница). К таким факторам относятся: наличие экстрактивных веществ в древесине, а также мембранной системы, расположенной в окаймлённой поре. Изучение влияния вышеуказанных факторов на процесс влагопереноса в

лиственничных пиломатериалах при конвективной сушке является целью данной статьи.

Таблица 1 – Распределение влажности по сечению лиственничной доски ($hxb = 50 \times 150$ мм). Время сушки - 350 часов. $W_{cp.} = 30,41\%$

Номер элемента по толщине	Влажность, %								
	Номер элемента по ширине								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	14,1	18,3	20,3	20,3	18,8	19,4	18,9	17,8	13,7
2	17,6	28,3	29,6	31,6	28,3	28,9	29,7	26,5	19,1
3	21,0	38,6	52,8	51,4	45,0	39,2	45,2	42,2	22,7
4	22,3	42,3	53,7	45,6	44,9	40,9	43,5	49,1	23,7
5	20,2	29,2	31,9	30,7	30,9	28,9	30,3	31,5	22,6
6	15,3	19,8	19,0	18,8	19,7	19,2	19,3	20,3	16,4

Примечание: Среднее значение начальной влажности высушиваемой партии пиломатериалов составляло 50,5%.

Экспериментальные исследования. Экспериментальные исследования, проведённые на древесине лиственницы, позволили сделать ряд выводов:

- древесина лиственницы (ядровая зона) при сушке низкотемпературными режимами (44 ... 84°C) проявляет химическую активность, которая выражается в виде образования в центре доски парогазовой смеси [4]. Основу этой смеси составляет смесь летучих с паром веществ с функциональными группами воды (в т.ч. кристаллизационной в гидратах), спиртов, фенолов, карбоновых кислот алифатического и ароматического рядов, а также непредельных соединений. Всего было зафиксировано 139 компонентов, объём которых превышает объём образца, из которого извлекалась парогазовая смесь в 5,5 ... 6 раз;

- установлена повышенная неопределённость в распределении влажности и водорастворимых экстрактивных веществ, которая связана с особенностями жизнедеятельности дерева, что на данный момент не поддаётся глубокому анализу;

- при сушке низкотемпературными режимами зафиксировано перераспределение по толщине доски как влаги, так и водорастворимых экстрактивных веществ [5], что указывает на перенос по толщине доски водного раствора экстрактивных веществ;

- в конденсате, который был получен путём конденсации агента сушки, обнаружены нитрит – ион, ион аммония, нитрат – ион, фенолы, формальдегиды и др. [6];

- экстрактивные вещества в процессе сушки изменяют своё физическое состояние, проходя стадии «золь – гель - ксерогель».

Обсуждение. Полученные результаты экспериментальных исследований позволили установить фактор, определяющий вывод влаги из древесины лиственницы – образование смеси летучих веществ с парами воды. Повышение температуры древесины инициирует образование в древесине некоторого количества водяных паров. Одновременно с водяными парами в древесине в результате химических реакций происходит накопление спиртов, фенолов и других легколетучих веществ. Каждый из полученных компонентов парогазовой смеси формируют парциальное давление (p_n), что предопределяет образование некоторого суммарного давления (p_c) [7], значение которого превышает атмосферное давление (p_a). В результате соотношения $p_c > p_a$ наблюдается вывод парогазовой смеси из древесины. При этом интенсивность извлечения парогазовой смеси $G_{см}$, мл/(см²·ч), носит циклический характер (рисунок 1).

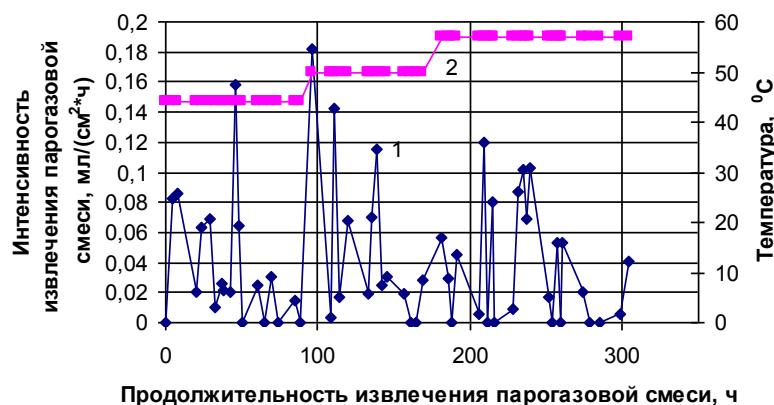


Рисунок 1 – Зависимость скорости извлечения парогазовой смеси от температуры: 1 - скорость извлечения парогазовой смеси; 2 – температура нагрева древесины [8]

Цикличность вывода парогазовой смеси указывает на наличие своеобразной «клапанной» системы, которая поддерживает некоторое давление внутри клетки. Таким регулятором в древесине выступают мембраны, находящиеся в окаймлённых порах (рисунок 2.). Представленная на рисунке 2 микрофотография позволяет утверждать, что мембрана способна выполнять разделительную функцию, устанавливая тем самым содержание влаги и экстрактивных веществ в полостях клеток. При создании некоторого градиента давления в полостях смежных клеток мембрана выступает в виде естественного фильтра.

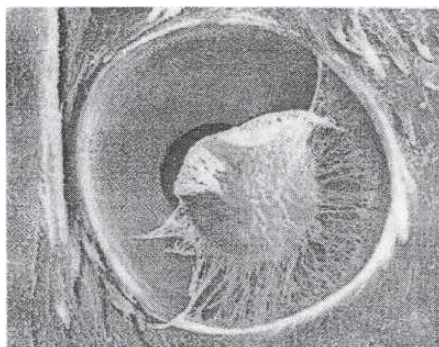


Рисунок 2 - Радиальный разрез окаймлённой поры [9]

Интенсивность вывода водного раствора экстрактивных веществ из древесины лиственницы $G_{вл.}$, кг/(м²·ч), имеет такой же характер извлечения, как и при извлечении парогазовой смеси (рисунок 3). Следовательно, образование парогазовой смеси создаёт в древесине лиственницы «поле переноса», под действием которого выводится из доски водный раствор экстрактивных веществ. На возможность переноса водорастворимых экстрактивных веществ через мембранную систему древесины лиственницы указывает тот факт, что основу данной группы веществ составляет арабиногалактан – клейкое, мембранотропное вещество [10], содержание которого составляет 21 ... 35 % от а.с.с.[11].

Представленные на рисунке 3 данные по удельной скорости сушки дают основание утверждать, что при определённых условиях наличие экстрактивных веществ не является сдерживающим фактором по переносу влаги по толщине доски. Так, в начальный период сушки (до 60 часа сушки) $G_{вл.}$ достигает (0,06 ... 0,065)

кг/(м²·ч), что соразмерно с интенсивностью вывода влаги из пиломатериалов древесины сосны.

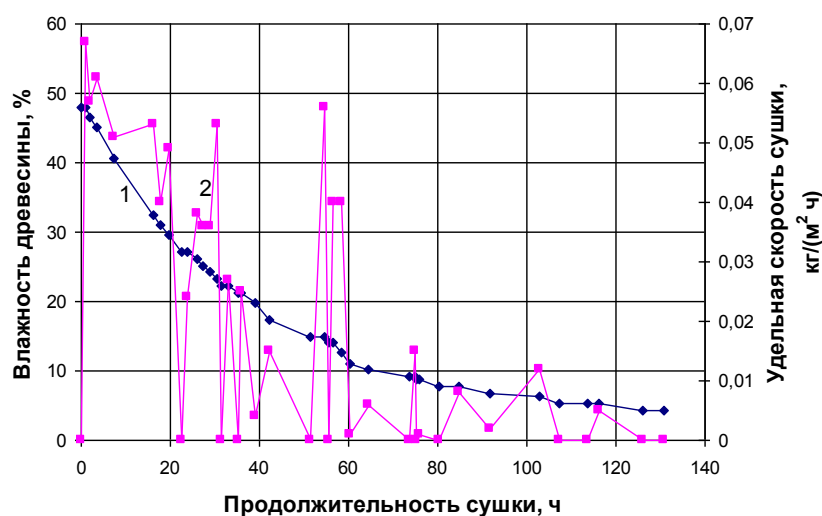


Рисунок 3 – Кинетика сушки лиственничной доски сечением 25x100 мм

При этом влага из доски выводится последовательно, начиная от периферии доски, и заканчивая центральной частью (таблица 2), что предопределяет выравнивание влажности по периферии (обозначено жирным шрифтом). Из этого следует, что в древесине лиственницы имеется система влагопроводящих путей, способная обеспечить равномерный вывод влаги как в радиальном, так и в тангенциальном направлении.

Таблица 2 - Распределение влажности по сечению доски сечением 25x100 мм после 33,5 часов сушки ($t_c = 44^\circ\text{C}$)

Номер элемента по толщине	Влажность, %									
	Номер элемента по ширине									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	16,6	19,3	18,8	17,2	17,2	18,5	16,8	17,0	17,4	14,0
2	16,7	41,6	30,9	26,1	26,6	30,5	28,1	26,9	26,5	17,8
3	19,1	56,6	46,1	40,4	38,1	46,8	39,8	38,6	36,5	20,7
4	18,4	41,5	27,2	29,7	28,3	27,8	28,4	28,5	27,8	19,6
5	17,8	19,6	18,9	18,2	18,5	18,4	18,0	18,4	18,2	14,9
Средняя влажность - 26,8%										

Циклический характер интенсивности вывода влаги из древесины лиственницы, а также последовательность изменения влаги позволили сформулировать гипотезу о механизме вывода влаги. Вывод влаги осуществляется в несколько этапов: на этапе прогрева древесины формируется парогазовая смесь по всему объёму доски, создавая тем самым некоторое избыточное давление; на следующем этапе парогазовая смесь выводится из доски через мембранную систему окаймлённых пор периферийной зоны доски. На данном этапе вместе с парогазовой смесью выводятся на поверхность доски экстрактивные вещества, находящиеся во внутриклеточном пространстве. Вывод парогазовой смеси с водным раствором экстрактивных веществ продолжается до момента выравнивания давления в поверхностной зоне доски с атмосферным давлением.

При выводе парогазовой смеси из поверхностной зоны доски создаются условия формирования перепада давлений внутри доски, что предопределяет перенос водного раствора экстрактивных веществ из центра доски в периферийную зону. Поэтому на следующем этапе осуществляется перераспределение парогазовой смеси вместе с водным раствором экстрактивных веществ из центра доски в периферийную зону, выравнивая тем самым давление по всему объёму доски.

Выведенный на поверхность доски парогазовой смесью водный раствор экстрактивных веществ разделяется на две основные фракции – на воду, которая испаряется с поверхности доски, и экстрактивные вещества. Это разделение предопределяет насыщение данной группой веществ периферийной зоны доски, включая поровую систему (рисунок 4), клейкой массой. Заполнение камеры поры экстрактивными веществами не оказывает какого-либо значимого влияния на влагопроводимость древесины периферийной зоны до тех пор, пока соблюдается водный баланс между массой влаги, которая поступает из центра доски, и испаряемой с поверхности доски.

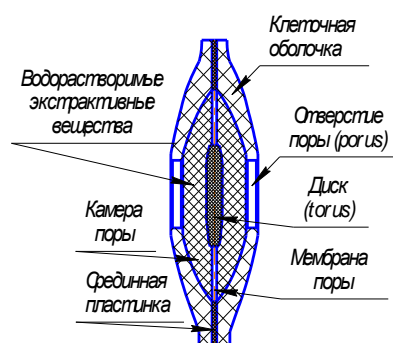


Рисунок 4 – Структурная схема окаймлённой поры

Нарушение баланса между массой влаги, которая поступает из центра доски, и массой, которая испаряется с поверхности доски практически мгновенно приводит к изменению физического состояния экстрактивных веществ, находящихся в поровой камере (рисунок 4). Переход экстрактивных веществ из геля в аморфно-кристаллическую структуру приводит к формированию блокирующего слоя в периферийной зоне доски [4], и как следствие скачкообразному снижению удельной скорости сушки $G_{вл.}$ - с 0,04 до 0,005 кг/(м²·ч) (рисунок 3).

Не вдаваясь в детализацию механизма проведения водного раствора экстрактивных веществ через окаймлённую пору древесины лиственницы, процесс передачи представим уравнением:

$$G_{аэ.} = -b \frac{dp}{dx}, \quad (2)$$

где b – коэффициент массопередачи через окаймлённую пору; dp/dx – градиент давления.

По своему физическому смыслу данное уравнение является законом Дарси [12], в котором коэффициент пропорциональности b характеризует природу взаимодействия раствора и мембраны в начальный период сушки, раствора и аморфно-кристаллической структуры на конечной стадии сушки. Ввиду того, что объём парогазовой смеси, который формируется в древесине при повышении температуры, - величина переменная, необходимо учитывать дополнительные условия.

Одним из направлений исследования данного вопроса может быть аналог процесса теплопередачи через многослойную конструкцию. Такой подход основывается на том, что водный раствор экстрактивных веществ последовательно проходит слои окаймлённой поры. Тогда для общей характеристики проводящей

способности окаймлённой поры может быть использована формула 3 [13], по которой определяется коэффициент массопередачи b :

$$b = \frac{1}{\frac{1}{\beta_1} + \frac{\delta_M}{\lambda_M} + \frac{\delta_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\beta_2}}, \quad (3)$$

где β_1, β_2 – коэффициенты массоотдачи на поверхностях отверстий пор; λ_M, λ_k – коэффициенты теплопроводности мембраны и слоя экстрактивных веществ; δ_M, δ_k – соответственно, толщина мембраны и слоя экстрактивных веществ.

Решение уравнения (3) сводится к определению лимитирующего процесса проводки и отдачи. Поэтому значение b всегда получается меньше значения лимитирующего процесса. В начальный период сушки лимитирующим процессом является проводка водного раствора экстрактивных веществ через мембрану, на последующих этапах сушки – через аморфно–кристаллическую структуру экстрактивных веществ.

Библиографический список:

1. Серговский, П.С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины [Текст] : учебник для вузов / П.С. Серговский, А.И. Расев. – 4 – е изд., перераб. и доп. – М.: Лесн. пром–сть, 1987. – 360 с.
2. Шубин, Г.С. Физические основы и расчет процессов сушки древесины [Текст] / Г.С. Шубин. - М.: Лесн. пром–сть, 1973. - 248 с.
3. Чудинов, Б.С. Вода в древесине [Текст] / Б.С. Чудинов. – Новосибирск: Наука, 1984. – 267 с.
4. Зарипов, Ш.Г. Избыточное давление в лиственничных пиломатериалах при низкотемпературной конвективной [Текст] / Ш.Г. Зарипов, В.Н. Ермолин// Лесной журнал. – 2011. - № 4 - С.52-57.
5. Зарипов, Ш. Г. Перераспределение водорастворимых экстрактивных веществ в древесине лиственницы в процессе конвективной сушки [Текст] / Ш. Г. Зарипов, В. Н. Ермолин // Хвойные бореальной зоны: теоретический и научно-практический журнал. – 2010. - Т. XXVII. - № 3-4. - С. 352-354.
6. Зарипов, Ш. Г. Экологические аспекты конвективной сушки лиственничных пиломатериалов [Текст] / Ш. Г. Зарипов, В. В. Якушев // Актуальные проблемы лесного комплекса: сб. науч. тр. / под общ. ред. Е. А. Памфилова. – Брянск, 2011. - Вып. 29. - С. 78-81
7. Трофимова, Т.И. Курс физики [Текст] / Т.И. Трофимова. - М.: Высшая школа, 2001. - 542 с.
8. Зарипов, Ш.Г. «Сила переноса» влаги в древесине лиственницы при конвективной сушке [Текст] / Ш.Г. Зарипов // Актуальные проблемы лесного комплекса: сборник научных трудов / под общей редакцией Е.А.Памфилова. – Брянск, В. 34. – 2012. – С.39 – 44.
9. Диагностические признаки древесины и целлюлозных волокон /под ред. Козубова Г.М., Зотовой-Степановской Н.П. – Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР. – 1976. – 152 с.
10. Антонова, Г.Ф. Водорастворимые вещества лиственницы и возможности их использования [Текст] / Г.Ф. Антонова, Н.А. Тюкавкина // Химия древесины. – 1983. - №2. - С. 89-96.
11. Левин, Э.Д. Комплексная переработка лиственницы [Текст] / Э.Д. Левин, О.Б. Денисов, Р.Э. Пен. – М.: Лесн. пром–сть, 1978. – 224 с.
12. Нигматулин, Р.И. Динамика многофазных сред [Текст] / Р.И. Нигматулин. – М.: Наука. – Т.1. – 1987. – 463 с.

13. Дытнерский, Ю. И. Мембранные процессы разделения жидких смесей [Текст] / Ю.И. Дытнерский. - М.: Химия, 1975.- 232 с.

Based on the results of the experimental research, the author proposes a hypothesis about the mechanism of withdrawal of moisture from wood of larch with the convective drying. Consideration is given to the work, which is done by gas-vapour mixture on a conclusion of a water solution of extractive substances through the pore system Siberian larch wood.