



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.047

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.5.151

РЕЖИМЫ СУШКИ ЛИСТВЕННИЧНЫХ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ В СУШИЛЬНЫХ КАМЕРАХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Ш.Г. Зарипов, д-р техн. наук, проф.

Лесосибирский филиал Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, ул. Победы, д. 29, г. Лесосибирск, Красноярский край, Россия, 662543; e-mail: zaripov_sh@mail.ru

В статье разрабатываются режимы сушки лиственничных пиломатериалов, основанные на положениях, принципиально отличающихся от тех, что заложены в современные режимы. Предполагается, что в процессе сушки влага в древесине перераспределяется в составе водного раствора экстрактивных веществ. При этом движущей силой массопереноса является перепад давлений, что позволяет рассматривать сушку как одну из разновидностей баромембранного переноса. Основным источником сопротивления переносу влаги – полимерная пленка, которая формируется на поверхности доски из экстрактивных веществ на начальной стадии сушки. Цель исследования – разработка основных положений формирования режимов сушки лиственничных пиломатериалов. Предполагается, что тепловая энергия, которая подводится к высушиваемому сортименту, расходуется на создание условий возникновения избыточного давления. Данный эффект объясняется образованием парогазовой смеси в результате химико-физической активности древесины лиственницы. Поэтому температура древесины служит своеобразной мерой протекания определенной группы физико-химических процессов. В результате устанавливаются химический состав и объем смеси. Уровень температуры также определяет проницаемость системы межклеточных мембран. В результате массопереноса на поверхность доски выводится содержимое полостей клеток древесины лиственницы: влага в жидком и газообразном состоянии, водорастворимые вещества (арабиногалактан), газовая смесь, в состав которой входят такие вещества, как серосодержащие соединения, вода, спирты, фенолы, карбоновые кислоты. В жидкой составляющей присутствует значительное количество водорастворимых веществ, в которых основная доля приходится на арабиногалактан, обладающий полиэлектролитными свойствами. Все эти вещества способны изменять свое физическое состояние в зависимости от внешних условий. Следующим этапом процесса удаления влаги из древесины лиственницы является массообмен, который следует рассматривать как процесс разделения на три основных группы веществ: одна испаряется – это парогазовая смесь и часть влаги, вторая – сливается на пол сушильной камеры, третья, к которой относится арабиногалактан, –

Для цитирования: Зарипов Ш.Г. Режимы сушки лиственничных пиломатериалов в сушильных камерах периодического действия // Лесн. журн. 2018. № 5. С. 151–160. (Иzv. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.5.151

накапливается на поверхности. Как показали опытные сушки, наличие на поверхности доски данной группы веществ в виде полимерной пленки оказывает значительное влияние на процесс удаления влаги из древесины лиственницы.

Ключевые слова: массоперенос, массообмен, лиственничные пиломатериалы, режимы сушки, арабиногалактан.

Введение

Обзор литературных источников [5, 6, 8, 11–20] по изучаемой проблеме показал, что современные режимы сушки пиломатериалов вообще и лиственничных в частности основаны на термодинамике необратимых процессов. Такой подход позволяет в полной мере применить основные положения физики капиллярных явлений при описании процессов влагопереноса и влагообмена и математически обосновать зависимость влагопереноса от влагообмена. В результате определены основные режимные параметры – температура и относительная влажность агента сушки.

Подобный подход только по форме отражает процессы, которые происходят в древесине лиственницы при сушке. При более детальном изучении процессов было установлено, что перенос влаги в лиственничных пиломатериалах осуществляется в составе водного раствора экстрактивных веществ. Поэтому более корректно в качестве основного рассматривать процесс массопереноса [4], а массообмен представлять как дополняющий.

При этом основной движущей силой является перепад давления по сечению высушиваемого сорта. Следовательно, перенос водного раствора в древесине лиственницы при сушке аналогичен баромембранному процессу. Рассматривая массоперенос и массообмен как два дополняющих друг друга и независимых процесса, необходимо синхронизировать их путем выстраивания определенным образом режимов сушки.

Цель исследования – разработка основных положений формирования режимов сушки лиственничных пиломатериалов с учетом образования на их поверхности полимерной пленки из экстрактивных веществ.

Результаты исследования

Изучение особенностей протекания любого термодинамического процесса в системе связано с изменением температурного поля. Поэтому при формировании режимов сушки особое внимание уделяется изменению температуры как в сушильной камере (t_c), так и на поверхности (t_n) и в центре ($t_{ц}$) доски.

Ниже приведены некоторые результаты опытных сушек лиственничных пиломатериалов, которые устанавливают наиболее характерные закономерности процессов.

Соотношение температурных показателей (t_c , t_n и $t_{ц}$ – в сушильной камере, на поверхности и в центре доски) представлено на рис. 1 [3].

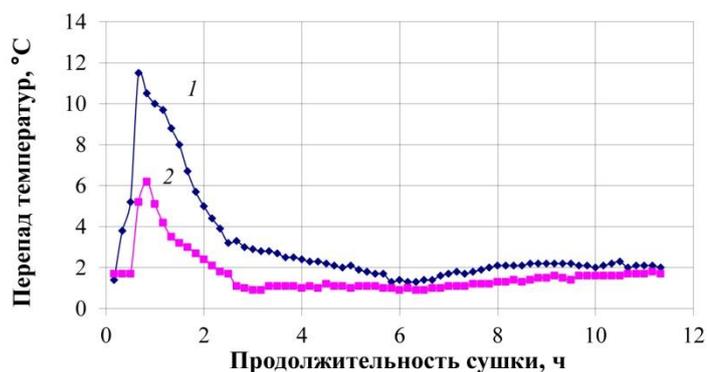


Рис. 1. Изменение температуры в высушиваемой системе: 1 – система «сушильная камера–поверхность доски» (Δt_1); 2 – система «поверхность доски–центр доски» (Δt_2) [3]

Fig. 1. The temperature change in the drying system: 1 – “drying chamber – board surface” system (Δt_1); 2 – “board surface – board center” system (Δt_2) [3]

Результаты экспериментальных исследований, отражающие зависимость интенсивности эмиссии парогазовой смеси от температуры в сушильной камере ($G_{\text{газ}}$ – удельная скорость эмиссии), приведены в табл. 1.

Таблица 1

Обобщенные характеристики процесса эмиссии парогазовой смеси

Температура, °С	Продолжительность, ч	Площадь эмиссии, см ²	Объем эмиссии, мл	Удельная скорость сушки, мл/(см ² ·ч)
44	86,7	25,7	84	0,037
50	83,3	25,7	90	0,047
57	145,0	25,7	109	0,034
–	$\sum \tau_c = 315$	–	283	$G_{\text{газ}} = 0,039$

Изменение интенсивности удаления влаги из древесины лиственницы в процессе сушки проиллюстрировано на рис. 2.

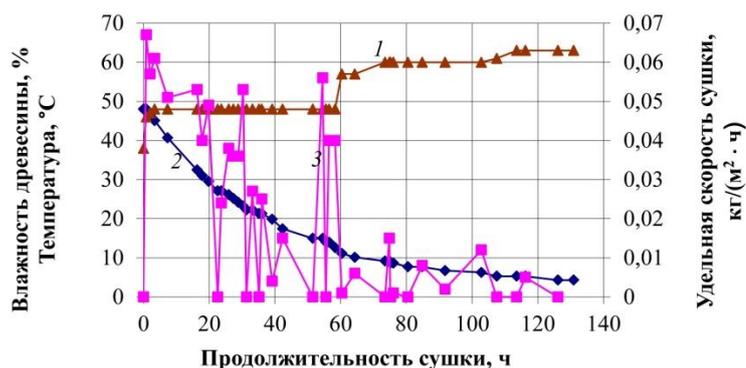


Рис. 2. Кинетика сушки лиственничных пиломатериалов сечением 25×100 мм: 1 – температура агента сушки; 2 – влагосодержание древесины; 3 – удельная скорость сушки

Fig. 2. Kinetics of drying larch sawn timber with a cross section of 25×100 mm: 1 – drying agent temperature; 2 – moisture content of wood; 3 – specific drying rate

Обсуждение результатов исследования

Проанализируем результаты экспериментов по изменению перечисленных выше температур во время сушки лиственных пиломатериалов (см. рис. 1). Как видно из графиков, подача тепловой энергии в сушильную камеру (период прогрева, или переход с одной ступени режима на другую) приводит к изменению внутренней энергии системы по некоторой закономерности.

Так, в течение 3 ч имеет место $(\Delta t_1 - \Delta t_2) \gg 0$. По истечении указанного периода температура по сечению высушиваемой системы практически выравнивается $(\Delta t_1 - \Delta t_2) \rightarrow 0$, что указывает на стабилизацию процессов прогрева пиломатериалов, испарения влаги с поверхности доски, теплопотерь через ограждения сушильной камеры.

Такое соотношение разности температур указывает на то, что основная масса тепловой энергии, которая доводится до поверхности доски, расходуется на прогрев древесины. Справедливость данного утверждения подтверждает соотношение разницы температур Δt_1 и Δt_2 – наблюдается интенсивное изменение температуры в центре доски. Следовательно, на испарение влаги с поверхности доски затрачивается относительно небольшая часть энергии. Поэтому психрометрическая разность не может рассматриваться как мера интенсивности удаления влаги при сушке лиственных пиломатериалов.

Анализ полученных результатов исследований позволил установить зависимость между такими процессами, как эмиссия парогазовой смеси в древесине лиственницы и удаление влаги [4]. Полученная закономерность послужила основанием для утверждения, что химико-физические процессы создают условия формирования движущей силы массопереноса [9] в древесине лиственницы при сушке посредством образования парогазовой смеси.

Экспериментально удалось установить (см. табл. 1), что каждому температурному уровню соответствует некоторый перечень химико-физических процессов, продолжительность которых ограничивается определенным временным отрезком. Для производства новых порций парогазовой смеси достаточно повысить температуру в сушильной камере. Таким образом, каждый температурный уровень является конкретной ступенью режима. Тогда более корректной мерой интенсивности удаления влаги из древесины служит удаление массы влаги с единицы площади доски в единицу времени или удельная скорость сушки (G , кг/(м²·ч)).

Анализ графиков кинетики сушки лиственных пиломатериалов показал (см. рис. 2), что удельная скорость обуславливается не содержанием влаги в древесине лиственницы, а другими факторами, которые формируются уже в процессе сушки. На это указывает скачкообразное изменение удельной скорости сушки, наблюдаемое при усредненной влажности древесины много ниже 30 %.

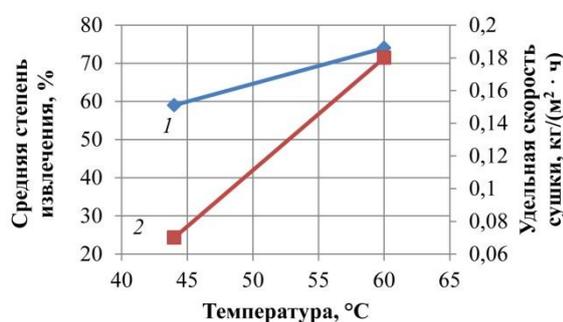
При более детальном изучении данного вопроса было установлено, что основное сопротивление выводу влаги на поверхность доски оказывает полимерная пленка, образующаяся на поверхности уже в процессе сушки [4]. Источником образования этой пленки является арабиногалактан, который выводится из древесины под действием избыточного давления. Сосредоточение на поверхности доски вещества, обладающего полиэлектролитными свойствами, создает условия для формирования полимерной пленки. Механизм ее образования изложен в ряде работ [1, 2, 7, 10].

Сформированная в начальный период полимерная пленка при сушке только уплотняется, при этом ее проницаемость снижается. Следовательно, образование полимерной пленки является тем фактором, который имеет решающее значение при удалении влаги из древесины лиственницы. Поэтому целесообразно режим сушки лиственничных пиломатериалов выстраивать с учетом такого явления, как образование полимерной пленки.

Продолжительность периода, когда формируется полимерная пленка, во многом зависит от интенсивности экстракции арабиногалактана, которая определяется температурой сушки. На рис. 3 приведены данные по интенсивности экстракции арабиногалактана [1] и удельной скорости сушки в зависимости от температуры [4].

Рис. 3. Интенсивность извлечения компонентов водного раствора при сушке: 1 – арабиногалактан; 2 – влага

Fig. 3. Extraction intensity of water solution components during drying: 1 – arabinogalactan; 2 – moisture



Нетрудно убедиться в том, что процессы экстракции и удаления влаги зависят от одних и тех же факторов: с повышением температуры увеличивается интенсивность извлечения как арабиногалактана, так и воды. Поэтому разделить эти процессы путем выстраивания определенным образом режимов не представляется возможным. Можно только уменьшить негативное влияние извлечения арабиногалактана на массоперенос, включая влагоперенос, за счет оптимизации процесса экстракции водного раствора.

Влияние температуры первой ступени сушки в целом на интенсивность вывода влаги из древесины лиственницы просматривается из ниже приведенных данных. Так, при изменении средневзвешенной влажности от начального значения $W_n = 55\%$ до конечного $W_k = 30\%$ интенсивность удаления влаги за 1 ч при температуре первой ступени $t_c = 44\text{ °C}$ составила 0,73 %, а при $t_c = 60\text{ °C}$ – 0,45 %.

На первый взгляд, в полученных данных имеет место некоторая нелогичность. Однако продолжительность образования полимерной пленки (τ_c) при $t_c = 44\text{ °C}$ составляет примерно 40...45 ч, а при $t_c = 60\text{ °C}$ – 15...25 ч. Поэтому наблюдается общее снижение интенсивности удаления влаги при повышении температуры первой ступени сушки.

Следующий комплекс проблем, которые необходимо решить при сушке лиственничных пиломатериалов, связан с синхронностью процессов влагопроводности и влагообмена. Их решение осложняется нестабильностью такого параметра, как удельная скорость сушки, который изменяется в широком диапазоне значений в течение ограниченного временного интервала (см. рис. 2).

Максимальное значение асинхронности процессов влагопроводности и влагообмена наблюдается в самый начальный период сушки, когда удельная

скорость сушки достигает максимального значения при предельной степени насыщенности влажностью агента сушки ($\varphi \rightarrow 100\%$). В этот период, продолжительность начального периода не превышает 25...30 ч, основная масса влаги с поверхности доски удаляется путем слива на пол камеры.

По истечении процессы влагопроводности и влагообмена синхронизируются. Для сохранения равновесия достаточно среднее значение скорости циркуляции агента сушки по штабелю поддерживать на уровне 1,5...2,0 м/с. На протяжении всего процесса сушки значение степени насыщенности должно быть 87...90 %, что позволяет создавать наиболее благоприятные (с точки зрения избежания появления трещин) условия.

На основании полученных результатов исследований была сформирована рекомендуемая структура режимов сушки лиственничных пиломатериалов экспортного назначения по ГОСТ 26002–83 «Пиломатериалы хвойных пород северной сортровки, поставляемые на экспорт» (табл. 2).

Таблица 2

Рекомендуемые режимы сушки лиственничных пиломатериалов экспортного назначения

Номер ступени	Продолжительность сушки, ч	Температура агента сушки, °С, при толщине доски, мм			
		25	32	38	50
1	40...45	44	44	44	44
2	30...35	48	48	48	48
3	30...35	52	52	52	52
4	30...35	–	56	56	56
5	30...35	–	–	60	60
6	30...35	–	–	–	64

Примечание: Режимы ориентированы на конечную влажность древесины $W_k = 20 \pm 2\%$.

Предложенная структура режимов успешно используется в течение нескольких лет на одном из лесозаготовительных предприятий г. Лесосибирска.

На рис. 4 приведены графики изменения влажности лиственничных пиломатериалов толщиной 50 мм в шести точках (1–6) сушильной камеры, где установлены датчики влажности.

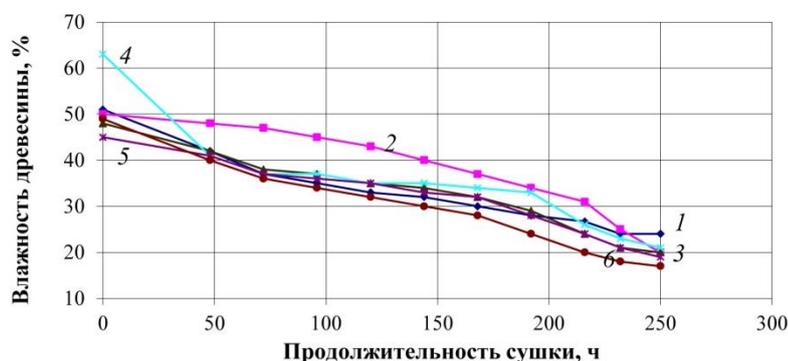


Рис. 4. Влажность древесины лиственницы в процессе сушки

Fig. 4. Humidity of larch wood in drying process

Из графиков (рис. 4) видно, что влага в пиломатериалах удаляется без видимых застойных явлений, что указывает на правильность выбранного подхода.

В табл. 3 представлены данные, отражающие распределение влажности в 150 точках отдельно взятой доски после завершения процесса сушки. Влажность определяли весовым способом.

Таблица 3

**Распределение влажности по поперечному сечению
лиственничной доски после сушки предлагаемыми режимами**

Номер элемента по толщине	Влажность, %									
	Номер элемента по ширине									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	12,1	13,5	14,7	15,0	14,9	13,1	14,7	13,8	12,2	10,3
2	12,4	16,2	18,0	18,2	19,3	18,7	20,1	18,0	15,5	10,7
3	13,7	17,6	18,8	23,1	21,4	22,5	22,6	19,9	17,3	12,2
4	13,2	17,8	19,5	21,8	22,7	24,3	22,8	21,6	18,9	12,7
5	13,6	17,5	20,1	23,4	23,7	25,4	23,4	20,9	19,4	14,3
6	14,9	17,2	19,4	20,6	24,2	26,1	22,7	20,8	17,9	13,1
7	14,6	17,1	19,4	20,0	23,2	25,0	22,5	21,3	19,3	13,4
8	13,9	16,9	18,4	19,6	20,6	27,4	22,3	21,0	19,0	12,9
9	12,7	15,5	17,2	17,8	18,9	24,3	21,7	19,5	16,8	12,3
10	11,0	12,3	12,8	13,9	14,0	18,2	16,7	16,1	14,1	11,1

Примечание: Среднее значение влажности $W_{cp} = 18,4 \%$.

Из приведенных в табл. 3 данных видно, что предлагаемая структура режимов близка к оптимальной, т. е. учитывает влияние основных факторов на процесс удаления влаги из древесины лиственницы. Влажность в пиломатериалах от начального значения 45...50 % до конечного $\cong 20 \%$ доводится за 230...250 ч.

За период эксплуатации предлагаемой структуры режимов образования так называемого водослоя в пиломатериалах не наблюдалось. Достоверность данного утверждения подтверждается результатами мониторинга с помощью сканера влажности после сушки на сортировочно-пакетирующей линии фирмы «ALMAB».

Выводы

1. Предлагаемая структура режимов сушки лиственничных пиломатериалов основывается на двух основных положениях: первое – перенос влаги по сечению доски происходит в составе водного раствора экстрактивных веществ под действием избыточного давления; второе – избыточное давление формируется за счет образования парогазовой смеси, как результат химико-физических процессов.

2. При разработке структуры режимов сушки лиственничных пиломатериалов процессы влагопереноса и влагообмена рассматриваются как два взаимонезависимых процесса. При этом определяющим выступает влагоперенос, дополняющим – влагообмен.

3. Предлагаемая структура режимов сушки лиственничных пиломатериалов оптимизирована относительно такого явления, как образование полимерной пленки.

4. Продолжительность каждой ступени режима определяется продолжительностью образования парогазовой смеси. Тогда количество ступеней устанавливается конечной влажностью пиломатериалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабкин В.А., Малков Ю.А., Остроухова Л.А., Онучина Н.А., Еськова Л.А. Эффективный антиоксидант из древесины лиственницы // Хвойные бореальной зоны. 2003. № 1. С. 108–113.
2. Василевская В.В., Хохлов А.Р. К теории заряженных полимерных сеток // Математические методы для исследования полимеров: материалы II всесоюз. совещ.: сб. / под ред. И.М. Лифшица и А.М. Молчанова. Пушино: АН СССР, Науч. центр биол. исслед., 1982. С. 45–52.
3. Зарипов Ш.Г. Рациональная технология начального прогрева лиственничных пиломатериалов перед конвективной сушкой // Хвойные бореальной зоны. 2012. Т. XXX, № 3-4. С. 347–350.
4. Зарипов Ш.Г. Совершенствование технологии сушки лиственничных пиломатериалов: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2016. 243 с.
5. Кречетов И.В. Сушка древесины. 3-е изд., перераб. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 432 с.
6. Серговский П.С., Расев А.И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины: учеб. для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Лесн. пром-сть, 1987. 360 с.
7. Филиппова О.Е. «Восприимчивые» полимерные гели // Высокомолекулярные соединения. Сер. С. 2000. Т. 42, № 12. С. 2328–2352.
8. Шубин Г.С. Физические основы и расчет процессов сушки древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 248 с.
9. Хванг С.-Т., Каммермейер К. Мембранные процессы разделения. М.: Химия, 1981. 464 с.
10. Хохлов А.Р., Дормидонтова Е.Е. Самоорганизация в ион-содержащих полимерных системах // Успехи физ. наук. 1997. Т. 167, № 2. С. 113–128.
11. Alexiou P.N., Wilkins P., Hartley J. Effect of Pre-Steamming on Drying Rate, Wood Anatomy and Shrinkage of Regrowth *Eucalyptus pilularis* Sm. // Wood Science Technology. 1990. No. 24. Pp. 103–110.
12. Avramidis S., Hatzikiriakos S.G., Siau J.F. An Irreversible Thermodynamics Model for Unsteady-State Nonisothermal Moisture Diffusion in Wood // Wood Science and Technology. 1994. No. 28. Pp. 349–358.
13. Baronas R. Ivanauskas F. Reducing Spatial Dimensionality in a Model of Moisture Diffusion in a Solid Material // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2004. Vol. 47, iss. 4. Pp. 699–705.
14. Bengtsson P., Sanati M. Measurement and Mathematical Modeling of the Hydrocarbon Emissions from Wood Drying // Proceedings of the 14th International Drying Symposium. São Paulo, Brazil, August 22–25, 2004. São Paulo, Brazil, 2004. Vol. B. Pp. 1352–1359.
15. Chen P., Pei D.C.T. A Mathematical Model of Drying Processes // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1989. Vol. 32, no. 2. Pp. 297–310.
16. Comstock G.L. Moisture Diffusion Coefficients in Wood as Calculated from Adsorption Desorption and Steady State Data // Forest Products Journal. 1963. Vol. 13, no. 3. Pp. 97–103.
17. Haghi A.K. A Mathematical Model of the Drying Process // Acta Polytechnica. 2001. Vol. 41, no. 3. Pp. 20–23.
18. Krischer O. Der Wärme- und Stoffaustausch im Trocknungsgut. Die analytische und grafische Behandlung der Trocknung poriger hygroskopischer Güter VDI-Forschungsheft 415. Berlin: NW 7 VDI-Verlag GmbH, 1942.
19. Krischer O., Kast W. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Berlin: Springer Verlag, 1978. 489 S.
20. Tuttle F. A Mathematical Theory of the Drying of Wood // Journal of the Franklin Institute. 1925. Vol. 200, iss. 5. Pp. 609–614.

UDC 674.047

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.5.151

Schedules of Larch Sawn Timber Drying in Intermittent Kiln

Sh.G. Zaripov, Doctor of Engineering Sciences, Professor

The Lesosibirsk branch of the Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, ul. Pobedy, 29, Lesosibirsk, Krasnoyarsk region, 662543, Russian Federation; e-mail: zaripov_sh@mail.ru

The article provides development of drying schedules of larch sawn timber based on concepts fundamentally different from those incorporated in present-day schedules. It is assumed that wood moisture is redistributed being a part of extractives water solution during drying. The pressure difference is a factor of mass transfer. Thus, it is possible to consider drying as a type of barmembrane transfer. At the initial stage of drying only a polymer film formed on the board surface from extractives provides resistance to moisture transfer. The purpose of the research is laying out the fundamental principles of formation of drying schedules of larch sawn timber. It is assumed that thermal energy brought to the drying lumber is expended for creating conditions of excessive pressure generation. This effect is explained by the formation of a steam gas mixture as a result of the chemical and physical activity of larch wood. Therefore, the wood temperature is a peculiar parameter of physical and chemical processes group. As a result mixture chemical composition and volume are established. The temperature level also determines the permeability of the intercellular membrane system. The contents of the larch wood cells lumen are derived to the board surface as a result of the mass transfer: moisture in liquid and gaseous state, water-soluble substances (arabinogalactan) and a gas mixture which consists of sulfur-containing compounds, water, alcohols, phenols, carboxylic acids. There is a significant amount of water-soluble substances, mainly consist of arabinogalactan, in the liquid component. This substance has polyelectrolyte properties. All these substances are capable to change their physical state depending on external conditions. The next stage of removing the moisture from larch wood is mass exchange. It should be considered as a process of substances separation into three main groups. The first is a steam gas mixture and a part of moisture. It evaporates. The second is drained on the floor of the drying chamber. The third includes substances (arabinogalactan) accumulated on the surface. Experimental drying showed that the presence of the third group of substances in the form of polymer film on the board surface has a significant effect on the moisture removal from larch wood.

Keywords: mass transfer, mass exchange, larch sawn timber, drying schedules, arabinogalactan.

REFERENCES

1. Babkin V.A., Malkov Yu.A., Ostroukhova L.A., Onuchina N.A., Es'kova L.A. Effektivnyy antioksidant iz drevesiny listvennitsy [Effective Larch Wood Antioxidant]. *Khvoynyye boreal'noy zony* [Hardwood of Boreal Zone], 2003, no. 1, pp. 108–113.
2. Vasilevskaya B.B., Khokhlov A.P. K teorii zaryazhennykh polimernykh setok [On the Theory of Charged Polymer Networks]. *Matematicheskiye metody dlya issledovaniya polimerov: materialy II vsesoyuz. soveshchaniya: sb.* [Mathematical Methods for Studying the Polymers. II All-Union Meeting Proceedings]. Ed. by I.M. Lifshitsa, A.M. Molchanova, Pushchino, AN SSSR, Nauch. tsentr biol. issled Publ., 1982, pp. 45–52.

For citation: Zaripov Sh.G. Schedules of Larch Sawn Timber Drying in Intermittent Kiln. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2018, no. 5, pp. 151–160. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.5.151

3. Zaripov Sh.G. Ratsional'naya tekhnologiya nachal'nogo progreva listvennichnykh pilomaterialov pered konvektivnoy sushkoy [Rational Technology of Initial Heating of Larch Sawn Timber before Convective Drying]. *Khvoynyye boreal'noy zony* [Hardwood of Boreal Zone], 2012, vol. 30, no. 3–4, pp. 347–350.
4. Zaripov Sh.G. *Sovershenstvovanie tekhnologii sushki listvennichnykh pilomaterialov*: dis. ... d-ra tekhn. nauk. [Improvement of Technology of Larch Sawn Timber Drying: Dr. Techn. Sci. Diss.]. Moscow, 2016. 243 p.
5. Krechetov I.V. *Sushka drevesiny* [Drying of Wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 432 p. (In Russ.)
6. Sergovskiy P.S., Rasev A.I. *Gidrotermicheskaya obrabotka i konservirovaniye drevesiny*: ucheb. dlya vuzov [Hydrothermal Treatment and Preservation of Wood. Textbook for University]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1987. 360 p. (In Russ.)
7. Filippova O.E. «Vospriimchivyye» polimernyye geli [Sensitive Polymer Gels]. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya. Ser. S* [Polymer Science. Series S], 2000, vol. 42, no. 12, pp. 2328–2352.
8. Shubin G.S. *Fizicheskiye osnovy i raschet protsessov sushki drevesiny* [Physical Basis and Calculation of Wood Drying Processes]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 248 p. (in Russ.)
9. Hwang S.-T., Kammermeyer K. *Membrannyye protsessy razdeleniya* [Membranes in Separations]. Trans. from Eng. by E.P. Morgunova, Yu.N. Zhilin, ed. by prof. Yu.I. Dytnerskiy, Moscow, Khimiya Publ., 1981. 464 p. (In Russ.)
10. Khokhlov A.R., Dormidontova E.E. Samoorganizatsiya v ion-soderzhashchikh polimernykh sistemakh [Self-Organization in Ion-Containing Polymer Systems]. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* [Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)], 1997, vol. 167, no. 2, pp. 113–128.
11. Alexiou P.N., Wilkins P., Hartley J. Effect of Pre-Steamming on Drying Rate, Wood Anatomy and Shrinkage of Regrowth *Eucalyptus pilularis* Sm. *Wood Science Technology*, 1990, no. 24, pp. 103–110.
12. Avramidis S., Hatzikiriakos S.G., Siau J.F. An Irreversible Thermodynamics Model for Unsteady-State Nonisothermal Moisture Diffusion in Wood. *Wood Science and Technology*, 1994, no. 28, pp. 349–358.
13. Baronas R. Ivanauskas F. Reducing Spatial Dimensionality in a Model of Moisture Diffusion in a Solid Material. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, vol. 47, iss. 4, pp. 699–705.
14. Bengtsson P., Sanati M. Measurement and Mathematical Modeling of the Hydrocarbon Emissions from Wood Drying. *Proceedings of the 14th International Drying Symposium*. São Paulo, Brazil, August 22–25, 2004. São Paulo, Brazil, 2004, vol. B, pp. 1352–1359.
15. Chen P., Pei D.C.T. A Mathematical Model of Drying Processes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1989, vol. 32, no. 2, pp. 297–310.
16. Comstock G.L. Moisture Diffusion Coefficients in Wood as Calculated from Adsorption Desorption and Steady State Data. *Forest Products Journal*, 1963, vol. 13, no. 3, pp. 97–103.
17. Haghi A.K. A Mathematical Model of the Drying Process. *Acta Polytechnica*, 2001, vol. 41, no. 3, pp. 20–23.
18. Krischer O. *Der Wärme- und Stoffaustausch im Trocknungsgut. Die analytische und grafische Behandlung der Trocknung poriger hygroskopischer Güter VDI-Forschungsheft 415*. Berlin, NW 7 VDI-Verlag GmbH, 1942.
19. Krischer O., Kast W. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. *Trocknungstechnik*. Band 1. Berlin, Springer Verlag, 1978. 489 S.
20. Tuttle F. A Mathematical Theory of the Drying of Wood. *Journal of the Franklin Institute*, 1925, vol. 200, iss. 5, pp. 609–614.

Received on April 25, 2017