

Шульгин Владимир Алексеевич

ОСОБЕННОСТИ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ

В статье рассматриваются особенности сушки древесины как природного биологического композиционного материала, представляющего собой сложную гетерогенную структуру, состоящую из веществ как органического, так и неорганического происхождения. Цель работы заключается в отражении отличительных особенностей процессов сушки древесины, базирующихся на закономерностях молекулярной физики, термодинамики и электродинамики. Основываясь на существующем методологическом материале, автор ставит задачи дальнейшего исследования и разработки систем управления, позволяющих производить высокоинтенсивную и высокотехнологичную качественную сушку древесины в промышленных масштабах.

Адрес статьи: www.gramota.net/materials/1/2013/3/62.html

Статья опубликована в авторской редакции и отражает точку зрения автора(ов) по рассматриваемому вопросу.

Источник

Альманах современной науки и образования

Тамбов: Грамота, 2013. № 3 (70). С. 215-218. ISSN 1993-5552.

Адрес журнала: www.gramota.net/editions/1.html

Содержание данного номера журнала: www.gramota.net/materials/1/2013/3/

© Издательство "Грамота"

Информация о возможности публикации статей в журнале размещена на Интернет сайте издательства: www.gramota.net

Вопросы, связанные с публикациями научных материалов, редакция просит направлять на адрес: almanac@gramota.net

УДК 674.047:66.047354

Технические науки

В статье рассматриваются особенности сушки древесины как природного биологического композиционного материала, представляющего собой сложную гетерогенную структуру, состоящую из веществ как органического, так и неорганического происхождения. Цель работы заключается в отражении отличительных особенностей процессов сушки древесины, базирующихся на закономерностях молекулярной физики, термодинамики и электродинамики. Основываясь на существующем методологическом материале, автор ставит задачи дальнейшего исследования и разработки систем управления, позволяющих производить высокоинтенсивную и высокотехнологичную качественную сушку древесины в промышленных масштабах.

Ключевые слова и фразы: теплообмен и массообмен; прочностные характеристики; сушильные напряжения и деформация; теплоперенос и влагоперенос; градиенты влагосодержания, давления и температуры; микроклиматрия.

Шульгин Владимир Алексеевич*Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова**v.shulgin@agtu.ru***ОСОБЕННОСТИ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ[©]**

Качество материала, полученного в результате сушки древесины в сушильной камере, определяется во многом режимом сушки, т.е. технологическими параметрами сушки, которые необходимо неукоснительно соблюдать для получения качественного материала. Поскольку древесина как сырье для последующей обработки материала представляет собой природный биокомпозит [2], основой которого являются три группы биополимеров: целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин, то и режим сушки в основном определяется реакцией компонентов сырья на теплотехническую обработку. Режим же сушки во многом определяется физическим процессом, основанном на закономерностях молекулярной физики и термодинамики, иначе, на закономерностях теплообмена и массообмена в древесине. Качество древесины в значительной мере определяется параметрами окружающей среды и закономерностями распределения влажности по сечению материала. Поэтому уделяется большое внимание *изучению процессов теплообмена и массообмена, прочностных характеристик и возникновению сушильных напряжений и деформаций в древесине* в процессе сушки. Профессор П. С. Коссович был одним из первых ученых России, занимающихся исследованием перемещения влаги в капиллярно-пористых телах. Позднее общая теория сушки была рассмотрена А. В. Лыковым в работе [11]. Вопросам сушки были посвящены также работы П. Д. Лебедева [10], Б. А. Поснова [12], В. А. Баженова [1], И. В. Кречетова [9], П. С. Сергеевского [14-18], Г. С. Шубина [19-20] и других авторов.

Как известно, между древесиной и водой существуют химические и физические связи. В процессах десорбции следует затрачивать не только энергию на испарение влаги, равную удельной теплоте парообразования, но и дополнительную энергию, требующуюся для разрыва молекулярных связей между влагой и древесиной. На величину удельной теплоты парообразования оказывает влияние температура десорбции воды. Зависимости удельной теплоты парообразования от температуры приводятся в справочниках по физике и теплотехнике [8]. Максимальная величина удельной теплоты парообразования 2500 кДж/кг существует при температуре 0°C. При повышении температуры величина удельной теплоты парообразования снижается по гиперболическому закону. И при температуре около 340°C она составляет 1000 кДж/кг, а при температуре 373°C величина удельной теплоты парообразования становится нулевой.

Энергетическое взаимодействие древесины с влагой рассмотрено в работе П. А. Ребиндера [13]. Математическое выражение, определяющее энергию A связи воды с древесиной, в результате преобразований, выполненных Г. С. Шубиным [19], выглядит следующим образом:

$$A = -R_n T \ln \varphi,$$

где R_n - газовая постоянная водяного пара, равная 461,58 Дж/(кг·К); T - температура, К; φ - степень насыщенности воздуха.

Энергия связи резко падает с увеличением влажности [2, с. 104]. Рассматривая диапазон сушки до эксплуатационной влажности 6-7%, следует отметить, что максимальные затраты возникают на конечном этапе сушки. Поскольку именно на конечном этапе сушки приходится преодолевать максимальную энергию связи между древесиной и водой, когда значение энергии может составлять 80-150 кДж/кг, а температура сушки не должна превышать 100°C (при нормальном давлении). Предельное интегральное значение воздействия температуры на древесину снижает значение эксплуатационной прочности древесины, увеличивает деформативность. Это обусловлено воздействием высокой температуры на химическую структуру древесинного вещества [17, с. 37]. Разница энергетических расходов процессов сушки, выполняющихся при температуре 40 и 100°C, составляет около 200 кДж/кг.

Движению влаги в древесине при сушке посвящены работы многих ученых, однако, несмотря на большое число выполненных работ по законам диффузии и потенциалам переноса, продолжаются дискуссии в связи с трудностью аналитического решения дифференциальных уравнений, описывающих процессы теплопереноса и влагопереноса. При этом приходится прибегать к вариантам упрощенного описания процессов и применять алгебраические методы решения дифференциальных уравнений.

В основном, влагоперенос в древесине происходит посредством *диффузии на молекулярном уровне, конвекции и термодиффузии*.

Массовый поток диффузии q'_{iD} , кг/м²с, получил название закона Фика и предполагает перенос влаги под влиянием разницы концентрации:

$$q'_{iD} = -\rho_0 D_i \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (1.1)$$

где D_i - коэффициент диффузии, м²/с; ρ_0 - плотность сухой древесины, кг/м³; $i = 2, 3$, соответственно для жидкости и газообразной фазы; $\partial u/\partial x$ - градиент влагосодержания.

Конвективный (молярный) поток массы q'_{ik} , кг/м² с, описывается уравнением Дарси:

$$q'_{ik} = \rho_i V_i = -K_i \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (1.2)$$

где ρ_i - плотность перемещаемого вещества, кг/м³; V_i - скорость перемещения вещества, м/с; K_i - коэффициент проницаемости, с; $\partial p/\partial x$ - градиент давления; $i = 2, 3$, соответственно для жидкости и газовой фазы.

Термодиффузионный поток массы q'_{iTD} , г/м²с, описывается уравнением:

$$q'_{iTD} = -\rho_0 \frac{D_{T,i}}{T} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (1.3)$$

где D_T - коэффициент термодиффузии, м²/с; T - температура, К; $i = 2, 3$, соответственно для жидкости и газовой фазы.

Тогда для интенсивных (высокотемпературных) процессов суммарный поток массы i -й компоненты q'_i определяется всеми разновидностями потока массы:

$$q'_i = q'_{iD} + q'_{ik} + q'_{iTD} \quad (1.4)$$

Малоинтенсивные (низкотемпературные) процессы имеют давление внутри древесины, близкое к атмосферному давлению, конвективный поток при этом весьма незначителен, и им можно пренебречь по сравнению с другими компонентами. Тогда выражение (1.4) будет выглядеть так:

$$q'_i = q'_{iD} + q'_{iTD} \quad (1.5)$$

В связи с тем, что очень сложно выделить отдельно потоки жидкой и газообразной среды в общем потоке массы, уравнения массопереноса записывают для суммарного потока, вводя определяемые экспериментально соответствующие коэффициенты. Величина диффузии характеризуется коэффициентом теплопроводности молекулярного и капиллярного переноса влаги (аналога коэффициента температуропроводности) a' , м²/с, а термодиффузия - относительным коэффициентом термодиффузии δ , 1/К.

Получим выражение для интенсивного процесса массопереноса, обозначив $D_{T,i}/T = a'\delta$:

$$q' = -a' \rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \delta \frac{\partial T}{\partial x} \right) - a'_p \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (1.6)$$

где a'_p - коэффициент теплопроводности молярного переноса пара.

Для малоинтенсивного (низкотемпературного) процесса (1.5):

$$q' = -a' \rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \delta \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1.7)$$

Основываясь на уравнениях влагопереноса, можно рассмотреть механизм процесса камерной сушки древесины, который не может быть единым во всех случаях. Он зависит от сравнительной эффективности каждой из рассмотренных движущих сил влагопереноса для получения качества сырья и имеет ограничения в процессе теплообмена, основанные на свойствах древесины.

Малоинтенсивные процессы камерной сушки в связи с невысокой скоростью сушки позволяют высушивать материал с меньшими градиентами температуры.

Процесс сушки при использовании высокотемпературного режима происходит, в отличие от низкотемпературного процесса, при температуре выше 100°C, поэтому жидкая влага в древесине не испаряется, а выкипает. Также и в низкотемпературных процессах массоперенос в древесине происходит за счет тепловой энергии, подводимой извне. Внутри материала при этом развивается избыточное давление, и возникает молярный или фильтрационный перенос паровоздушной смеси, определяемый членом уравнения $a'_p \frac{\partial P}{\partial x}$,

т.е. перенос влаги в данном случае происходит под действием градиента влагосодержания и градиента избыточного давления. При этом количество энергии, поступающее в центральные зоны, зависит от свойств древесины, которая обладает малым коэффициентом теплопроводности. Поэтому даже для древесины влажностью более 120% значение коэффициента теплопроводности λ остается менее 0,4 Вт/(м·°С).

Таким образом, для сушки древесины, обладающей весьма высоким термическим сопротивлением, требуется достаточно много времени. На практике сушку производят в две или в три ступени. При использовании двух ступеней можно рассмотреть процесс сушки на первой ступени до влажности 20%, что соответствует отсутствию свободной воды в древесине. На второй ступени сушки процесс становится более медленным и экономически затратным, поскольку приходится затрачивать больше энергии для удаления химически связанной воды.

Здесь следует заметить, что качество сушки будет существенно зависеть от величины градиентов интенсивности q_i' , поскольку процесс конвективной сушки древесины сопровождается неравномерным по объему распределением влажности, что вызывает неравномерную усушку, являющуюся, в свою очередь, причиной образования внутренних напряжений и деформаций высушиваемого материала. Чтобы уменьшить внутренние напряжения и сохранить интенсивность процесса приходится увеличивать значения равновесной влажности и температуры в камере. Однако при воздействии высокой температуры снижается прочность древесины, что является недопустимым.

Таким образом, при обычной конвективной сушке перегретым паром ограничиваются возможности интенсификации процесса в связи со следующими противоречивыми явлениями. Высокая влажность сушильного агента в камере позволяет снизить внутренние напряжения, но при этом снижается внешний влагообмен, что приводит к увеличению продолжительности процесса. Снижение влажности агента сушки сокращает время сушки, но при этом в результате образования значительных внутренних напряжений снижается качество материала.

Высокоинтенсивную сушку материала при обеспечении необходимого качества материала можно осуществить в том случае, если внутренний перенос влаги к поверхностным зонам осуществляется с малыми градиентами влагосодержания. Это становится возможным, если выполнять процесс, изменив знак перед вторым членом уравнения потока массы (1.6). Изменение направления градиента температуры эквивалентно созданию внутреннего источника энергии диэлектрического нагревания древесины. При диэлектрической сушке уравнение массопереноса приобретает вид:

$$q' = -a' \rho_0 \frac{\partial u}{\partial x} \pm a' \rho_0 \delta \frac{\partial T}{\partial x} - a_p' \frac{\partial P}{\partial x} \quad (1.8)$$

Подводя к влажной древесине электромагнитную энергию, можно регулировать уровень ее объемной плотности комплексной мощности $\tilde{S}'_{ст}$ стороннего источника, контролируя температуру центральных зон, поддерживая ее на требуемом для получения качества материала уровне. При этом величиной уровня подводимой удельной мощности можно регулировать и давление паровоздушной среды в материале (теоретически можно разрушить древесину за счет избыточного давления, возникающего от ее газопроницаемости при возникновении внутреннего давления).

При диэлектрическом нагревании древесины высокая интенсивность внутреннего влагопереноса сдерживается внешним влагообменом со средой. Если не интенсифицировать внешний влагообмен, в материале возникает отрицательный градиент влажности, влагосодержание поверхностных зон становится выше внутренних. Для интенсификации процесса возникает необходимость комбинации метода с конвективной либо вакуумной сушкой.

Вакуумная сушка позволяет проводить досушивание материала на второй ступени при влажности менее 20%, т.к. снижение давления позволяет испарять влагу при более низких допустимых температурах при меньших энергетических затратах. Изменяя степень насыщенности и температуру сушильного агента, можно поддерживать требуемый уровень внешнего влагообмена.

Таким образом, комбинированный метод сушки позволяет с малой инерционностью регулировать как внутренний влагоперенос, так и внешний влагообмен. С применением микроволнового излучения для сушки древесины появилась возможность интенсивной сушки древесины с обеспечением требуемого качества посредством регулирования величины внутренних напряжений.

В связи с достаточно высокой стоимостью микроволновой энергии наиболее экономичным становится процесс сушки, при котором энергия СВЧ расходуется на внутренний влагоперенос, а испарение влаги происходит за счет тепловой энергии, подводимой к поверхности материала конвективным путем.

В отличие от конвективной сушки, при которой энергетический баланс зависит от температуры поверхности тела, энергия СВЧ определяет интенсивность внутреннего парообразования. Поэтому при микроволновой сушке происходит объемное парообразование, интенсивность которого не определяется испарением со свободной поверхности. Это положение находит экспериментальное подтверждение [2]. Обобщенное математическое описание процессов теплопереноса и массопереноса при использовании электромагнитного излучения СВЧ приведено Г. С. Шубиным [20].

Частная производная объемной концентрации i -го связанного вещества по времени $\frac{\partial U_i \rho_0}{\partial \tau}$ (кг/м³) равна сумме дивергенций диффузионных $q_{i, \text{диф}}$ и молярных $q_{i, \text{мол}}$ потоков массы и источника i -го вещества q_i^x , в соответствии с фазовым переходом:

$$\frac{\partial U_i \rho_0}{\partial \tau} = -\text{div}(q_{i, \text{диф}} + q_{i, \text{мол}}) + q_i^x \quad (1.9)$$

Для теплопереноса частная производная от объемной концентрации энтальпии (теплосодержания) по времени $c \rho_0 \frac{\partial T}{\partial \tau}$ равна дивергенции плотности потока энтальпии теплопроводности или диффузионного и молярного движения:

$$c \rho_0 \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \nabla T) + \sum i q_i^x - \sum (q_{i, \text{диф}} + q_{i, \text{мол}}) c_i \nabla T, \quad (1.10)$$

где C - удельная теплоемкость тела; $\sum (q_{i, \text{диф}} + q_{i, \text{мол}}) c_i \nabla T$ - конвективная составляющая переноса массы; $\sum i q_i^x$ - источник тепла; ∇T - градиент теплопереноса.

Увеличение удельной объемной мощности СВЧ при наличии в древесине свободной воды практически не изменяет температуру древесины. Интенсивность сушки значительно возрастает в связи с тем, что подвод тепла при СВЧ нагревании осуществляется без промежуточных термических сопротивлений (преобразований) по сравнению с традиционным конвективным процессом.

Большую работу в области исследования СВЧ-сушки древесины проделал д.т.н. профессор МГУЛ В. П. Галкин [2]: «В наших условиях, подводимая к древесине максимальная объемная мощность СВЧ не превышает 0,01 Вт/см³». Из сравнения энергетических затрат на сушку с данными Ф. Х. Гареева [6] следует достаточно хорошее совпадение результатов.

В соответствии с описанным выше, в настоящее время комбинированная СВЧ-сушка древесины по-прежнему является актуальной, что подтверждается [2-7], востребованной для промышленной сушки древесины в России, экономически выгодной и целесообразной для использования. Вместе с тем, существуют недостаточно освещенные вопросы микроволновой сушки, связанные с исследованием функциональных энергетических зависимостей для построения автоматизированных систем управления.

Список литературы

1. **Баженов В. А.** Проницаемость древесины жидкостями и ее практическое значение. М., 1952. 83 с.
2. **Галкин В. П.** Древесиноведческие аспекты инновационной технологии сушки древесины: монография. М.: ГОУ ВПО «МГУЛ», 2010. 238 с.
3. **Галкин В. П., Серый В. С., Галкина Т. В.** Способ камерной сушки влагосодержащих материалов: патент РФ на изобретение № 2206840. 2001.
4. **Галкин В. П., Уголев Б. Н. и др.** Устройство для камерной сушки влагосодержащих материалов: патент РФ № 86300. 2009.
5. **Гареев Ф. Х.** Нетрадиционная сушка древесины: вакуумная и СВЧ // Лесная промышленность. 2004 (18). № 5. С. 62-65.
6. **Гареев Ф. Х.** Проблемы и перспективы СВЧ-сушки древесины // Лесная промышленность. 2004 (14). № 1. С. 50-53.
7. **Гареев Ф. Х.** Сушка древесины электромагнитными волнами // Лесная промышленность. 2004 (22). № 9. С. 74-78.
8. **Енохович А. С.** Краткий справочник по физике. М.: Высшая школа, 1976. 228 с.
9. **Кречетов И. В.** Сушка древесины. М., 1980. 524 с.
10. **Лебедев П. Д.** Сушка инфракрасными лучами. М., 1953. 232 с.
11. **Лыков А. В., Михайлов Ю. А.** Теория тепло- и массопереноса. М., 1967. 535 с.
12. **Поснов Б. А.** Внутренние напряжения в древесине при ее сушке // Научный отчет ЦНИИМОД. 1939. Раздел «Б».
13. **Рибиндер П. А.** О формах связи влаги с материалами в процессе сушки // Всесоюзное научно-техническое совещание по сушке. М., 1958. С. 20-33.
14. **Серговский П. С.** Гидротермическая обработка и консервирование древесины. М., 1968. 448 с.
15. **Серговский П. С.** Гидротермическая обработка и консервирование древесины. М., 1975. 400 с.
16. **Серговский П. С.** О рациональных режимах сушки пиломатериалов в воздушных камерах периодического действия // Деревообрабатывающая промышленность. 1969. № 2, 3.
17. **Серговский П. С., Расев А. И.** Гидротермическая обработка и консервирование древесины. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Лесная промышленность, 1987. 360 с.
18. **Серговский П. С., Уголев Б. Н., Скуратов Н. В.** Об оптимизации режимов сушки пиломатериалов на основе анализа внутренних напряжений // Научные труды. М.: МЛТИ, 1980. Вып. 124.
19. **Шубин Г. С.** Сушка и тепловая обработка древесины. М.: Лесная промышленность, 1990. 336 с.
20. **Шубин Г. С.** Физические основы и расчет процессов сушки древесины. М.: Лесная промышленность, 1973. 248 с.