

СЕКЦИЯ 1. ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В УСЛОВИЯХ МИКРОВОЛНОВОГО НАГРЕВА ВЛАЖНОЙ ДРЕВЕСИНЫ

А.А. Косторева¹, Ж.А. Косторева¹, С.В. Сыродой²
Томский политехнический университет^{1,2}
ЭНИН, ТПТ, 5БМ6Г¹

1 Введение

Деревообработка является одной из перспективных отраслей промышленности как в Российской Федерации, так и за рубежом. За последние годы в России начался рост деревообрабатывающей промышленности, которая нуждается в заготовках из хвойных и лиственных пород древесины. Таким производствам необходима высококачественная обработанная продукция [1]. Поэтому древесина является одним из наиболее востребованных материалов на настоящее время [2].

Основным этапом деревообработки является удаление влаги. Одним из самых перспективных технологических решений на настоящее время является сушка древесины в поле микроволнового излучения (СВЧ-сушка). Натурные исследования (эксперимент) процессов тепло- и массопереноса, протекающих при СВЧ-сушке древесины очень дороги и сложны, а иногда и просто невозможно. Разработанные на настоящее время математические модели основаны на ряде существенных допущений, не учитывающих весь комплекс теплофизических и электрофизических процессов. Так, например, в [3], приведены результаты математического моделирования СВЧ-нагрева диэлектрика, при этом принимается, что распределение вектора напряженности электрического поля по образцу равномерно, соответственно и объемное тепловыделение также равномерно распределено. Однако, как известно из работ Д.К. Максвелла [4] распределение напряженности электрического поля в пространстве существенно не равномерно. В [5] приведены результаты численного решения задачи нагрева древесного образца в поле СВЧ, с учетом неравномерности ЭМ-поля. Однако, при этом не решается задача сушки образцы. Известно [6], что при обезвоживании пористых материалов формируется фронт фазового перехода, разделяющий водонасыщенный и сухой слои древесины. Вследствие внутреннего нагрева возможно образование зоны обезвоженной древесины внутри образца.

Подводя итог можно сказать, что разработка «адекватной» физической теории и обеспечивающей ее математической базы процессов микроволновой сушки древесины является актуальной и нерешенной до настоящего времени задачей. Последнее будет способствовать разработке оптимальных режимов сушки влажной древесины.

Цель работы: Экспериментальное и теоретическое исследование процессов тепло- и массопереноса, протекающих совместно в условиях интенсивных

фазовых (испарение воды) превращениях при интенсивном конвективно- микроволновом нагреве влажной древесины.

2 Эксперимент

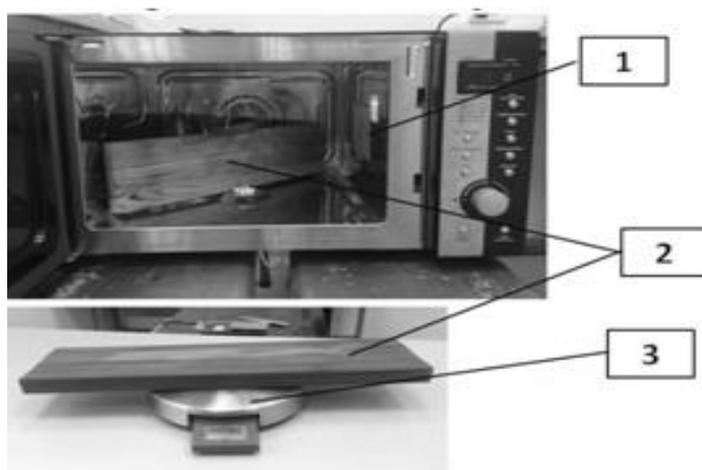


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1- СВЧ-печь, 2- Древесный образец, 3- Весы.

Перед проведением экспериментов древесные заготовки доводились до влажности φ свежесрубленного дерева $\varphi=30-40\%$. После этого образцы помещались внутрь СВЧ сушильной камеры. Затем древесина извлекалась, и проводилось контрольное взвешивание (период выдержки влажной заготовки в СВЧ-печи составлял 60 секунд, период взвешивания составлял не более $0,1 \cdot t_{\text{суш}}$). После взвешивания заготовка снова помещалась внутрь СВЧ-камеры и проводилось дальнейшее нагревание. Эксперименты повторялись до тех пор, пока изменение влажности в древесине за 60 секунд не превышало 0,01 %.

3 Постановка задачи

По результатам проведенных экспериментов сформулирована физическая и математическая модели исследованного процесса.

Физическая постановка

В начальный момент времени ($\tau=0$) древесная заготовка попадает в сушильную камеру и нагревается за счет комбинированного воздействия микроволнового излучения. В результате СВЧ-воздействия возникает внутреннее тепловыделение и инициируется процесс испарения влаги. Соответственно внутри древесного образца формируется слой сухой древесины с низким коэффициентом теплопроводности. Промежуток времени от начала нагрева до момента полого высыхания (полное удаление влаги) считается временем сушки t .

Соответственно, возможно формирование сухого слоя внутри образца и возникновение второго фронта испарения, который движется из глубины заготовки к поверхности.

Математическая постановка

Математически процесс сушки в рамках постановки, соответствующей выше изложенной физической модели, описывается уравнением энергии для влажной древесины с учетом эндотермического эффекта испарения:

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{Q_{\text{исп}} \cdot W_{\text{исп}} \cdot \delta(x_v)}{h_d} + q_{\text{свч}} \cdot \theta(x_{\text{исп}} - x) \quad (1)$$

$W_{\text{исп}}$ – скорость испарения (кг/(м²·с)) рассчитывалась по формуле [11]:

$$W_{isp} = \frac{V_0 \cdot \exp[-Q_{isp} \cdot M_0 \cdot (T-273)]}{R \cdot T \cdot 273}; \quad (2)$$

$q_{свч}$ – тепловой эффект (Вт/м³) СВЧ воздействия:

$$q_{свч} = \varepsilon_1 \cdot f \cdot tg \delta \cdot |E|^2 \quad (3)$$

где: C - теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); T – температура, К; θ – функция Хевисайда; δ – дискретная функция Дирка; Q_{isp} – теплота эндотермического эффекта испарения, Дж/кг; h_d – коэффициент размазывания фронта испарения, м, ε_1 – диэлектрическая проницаемость; f - частота электромагнитного поля, Гц; $tg \delta$ - угол диэлектрических потерь; $|E|^2$ - напряженность электромагнитного поля, В/м.

- уравнение (1) решалось при следующих граничных условиях:

$$\tau = 0: T = T_0$$

$$x = 0: \frac{\partial T}{\partial x} = 0; \quad (4)$$

$$x = l: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T_e - T); \quad (5)$$

Задача (1) - (5) решалась методом конечных разностей с использованием алгоритма аналогично [12-13]. Скорость «обезвоживания» вычислялась методом неявного выделения фронта испарения [14].

4 Результаты и их обсуждение

В таблице 1 приведены полученные экспериментально и теоретически времена сушки древесины. Можно отметить, что времена полной сушки древесного образца из кедра практически совпадают. Но для образца из ели отклонение теоретических и экспериментальных времен сушки около 30%. Последнее можно объяснить, тем что использовавшиеся при математическом моделировании исходные данные теплофизические и электрофизические характеристики ели ситхинской отличаются от аналогичных параметров ели обыкновенной, использованной в эксперименте.

Таблица 1.

Экспериментальные и теоретические времена сушки древесины.

Вид древесины	$t_{суш}$, С. Теоретические значения.	$t_{суш}$, С. Экспериментальные значения.	Относительное отклонения времен сушки, %
пихта	568	645	11,94
ель	564	810	29,13
сосна	579	510	13,53
кедр	560	660	1,52

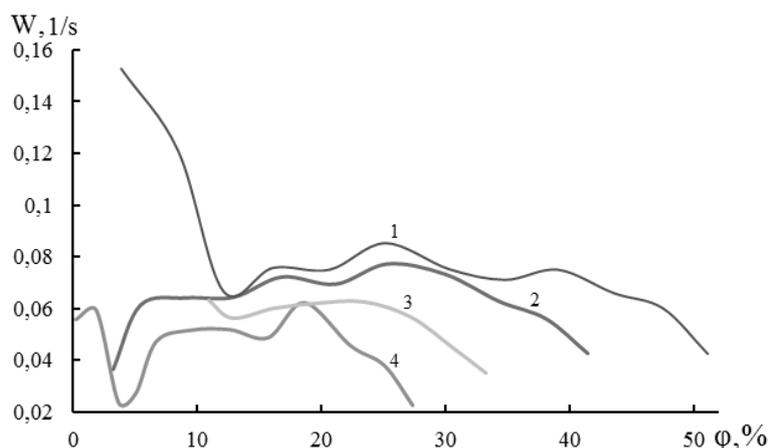


Рис. 2. Зависимость относительной скорости удаления $W=\Delta\phi/s$ от абсолютной влажности ϕ для образцов, выполненных из древесины: 1 – ель; 2 – пихта; 3 – сосна; 4 – кедр.

На рисунке 2 приведены зависимости скоростей влагоудаления от абсолютной влажности для образцов, выполненных из разных видов древесины. Можно отметить, что наибольший период обезвоживания соответствует сушке ели, в то время как наименьшая скорость удаления влаги зарегистрирована у кедра. Это объясняется существенными отличиями теплофизических и электрофизических свойств древесины. Вид кривых $W(\phi)$ для всех видов древесины одинаков, однако, для образцов из ели и кедра в конечной стадии (для ели $\tau = 720$ секунд, для кедра $\tau = 630$ секунд) сушки скачкообразно увеличиваются скорости обезвоживания.

На рисунке 3 приведены зависимости изменения массы древесной заготовки от времени сушки для образцов, выполненных из различных видов древесины. Характеристики изменения массы бруска для ели и кедра практически идентичны, соответственно, можно сделать обоснованный вывод, что такие виды древесины можно сушить в одной сушильной камере. Характеристики обезвоживания пихты существенно отличаются от аналогичных параметров сосны, ели и кедра. Соответственно, древесные образцы выполненные из пихты, нужно высушивать отдельно от остальных.

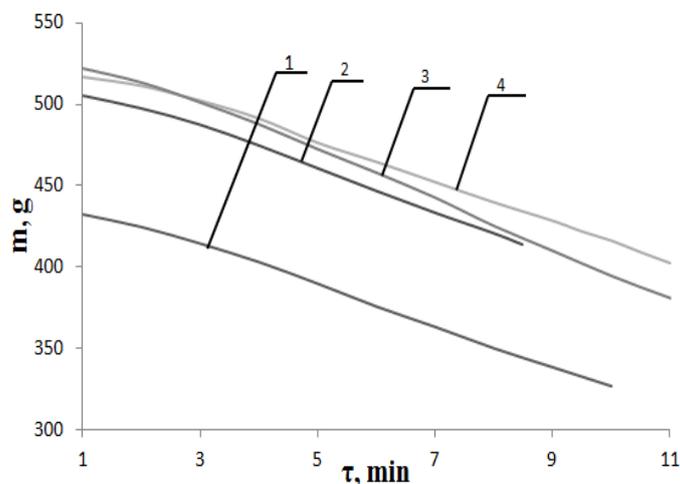


Рис. 3. Зависимости изменения массы образца (m) от времени сушки τ для образцов, выполненных из древесины: 1 – пихта; 2 – сосна; 3 – ёлка; 4 – кедр

Вывод

Приведены результаты экспериментальных и численных исследований процессов тепло- и массопереноса в условиях микроволнового нагрева влажной древесины. По результатам экспериментального исследования установлено существенное влияние скорости удаления влаги от абсолютной влажности древесного образца, при этом было отмечено, что эта зависимость существенно нелинейная. Так в начальный период сушки скорость удаления влаги возрастает, однако, по истечению времени $\tau=0,74 \cdot \tau_{\text{суш}}$ скорость обезвоживания начинает уменьшаться. Сравнительный анализ полученных экспериментальных данных и теоретических зависимостей, приведенных показали удовлетворительное соответствие. По результатам экспериментальных исследований была разработана математическая модель процессов тепломассопереноса протекающих при СВЧ-сушке. По результатам математического моделирования было установлено, что интегральные характеристики процесса сушки существенно зависят от вида древесины. Например, время сушки сосны, ели и кедра примерно одинаковы, в то время как $t_{\text{суш}}$ пихты существенно отличается. Соответственно, можно сделать вывод, что древесные заготовки из сосны, ели и кедра можно обезвоживать одновременно в одной сушильной камере.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (проект НШ – 7538.2016.8)

ЛИТЕРАТУРА:

1. Сафин Р.Р. Современные тенденции развития технологии сушки древесины // Вестник ТГУ, т.11. – 2006. N 4.
2. Кизина О.А., Адамович А.Л. Анализ современных методов и оборудования для сушки древесины // Вестник полоцкого государственного университета. Серия В. – 2011.
3. Саломатов В. В., Сладков С. О., Пащенко С. Э. СВЧ-технологии в угольной энергетике. Инженерно-физический журнал. 2012. Т. 85, № 3. С. 535-549
4. Максвелл Дж.К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. – М., 1952.
5. Microwave processing of materials/ National materials Advisory Board.- Washington: National Academy Press, 1994. – 150с
6. Лыков А.В. Сушка древесины. - М., 1937.
7. Хащенко А.А., Вечер О.В., Дискаева Е.И. Исследование температурной зависимости скорости испарения жидкостей со свободной поверхности и скорости кипения жидкости на твердой поверхности нагрева. Известия Алтайского государственного университета. – 2016. – Т. 89, № 1 – 2016.
8. Syrodoy S.V. N.Y. Gutareva R.I. Taburchinov. Influence of Absorption of Thermal Radiation in the Surface Water Film on the Characteristics and Ignition Conditions//MATEC Web of Conferences Volume 72, 2016, Article number 01109

9. S.V. Syrodoy, N. Yu. Gutareva. R. I. Taburchinov. Influence of Absorption of Thermal Radiation in the Surface Water Film on the Characteristics and Ignition Conditions// MATEC Web of Conferences Volume 72, 9 August 2016, Article number 01109 DOI: 10.1051/mateconf/20167201109
- 10.S.V. Syrodoy, N. Y. Gutareva. K. A. Bugaeva. Ignition of Wet Wood Particles in the Stream of High-Temperature Gases//MATEC Web of Conferences. Volume 72, 9 August 2016, Article number 01035. DOI: 10.1051/mateconf/20167201035

Научный руководитель: С.В.Сыродой, к.т.н., старший преподаватель каф. ТПТ ЭНИН ТПУ.

КОНВЕКТИВНО-РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПОЛОСТИ С ЛОКАЛЬНЫМ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ

С.А. Михайленко
Томский государственный университет

Изучение конвективного теплопереноса во вращающихся системах имеет большое значение при решении различных технических проблем, например, при проектировании газовых турбин высокого давления [1] или солнечных концентраторов [2]. Так, в [3] получены результаты численного моделирования конвекции во вращающемся цилиндрическом контейнере, заполненном ртутью, в условиях подогрева снизу. Моделирование конвективного теплопереноса во вращающейся замкнутой полости с локальным источником энергии постоянной температуры проводилось в [4]. Следует отметить, что большинство исследований конвективного теплопереноса во вращающихся системах проводится без учета влияния теплового поверхностного излучения.

Целью настоящей работы является численный анализ режимов естественной конвекции и поверхностного излучения во вращающейся квадратной полости, включающей локальный тепловыделяющий источник. Полость, представленная на рис. 1, заполнена ньютоновской жидкостью и вращается против часовой стрелки с постоянной угловой скоростью ω_0 . Нижняя и верхняя стенки считаются адиабатическими. На нижней стенке расположен твердый тепловыделяющий источник с постоянным объемным тепловыделением Q .