

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В УСЛОВИЯХ МИКРОВОЛНОВОГО И РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОГО НАГРЕВА ВЛАЖНОЙ ДРЕВЕСИНЫ

С.В. Сыродой, А.А. Косторева, Ж.А. Косторева
Томский политехнический университет
ЭНИН, ТПТ

Введение

За последние годы в России начался стремительный рост деревообрабатывающей промышленности, которая нуждается в заготовках из хвойных и лиственных пород древесины. Таким производствам нужна высококачественная обработанная продукция [1]. Поэтому древесина является одним из наиболее востребованных материалов на настоящее время [2].

Как правило, на производство привозят не прошедшую предварительную обработку влажную древесину [3]. Основным этапом деревообработки является удаление влаги. Этот этап подготовки является самым энергоемким (до 30% всей затрачиваемой мощности) [4]. Понижение влажности в бруске увеличивает ее прочность, уменьшает массу и улучшает склеиваемость [5].

Математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса приобретает значительную роль для науки и техники. Для современного производства необходим точный прогноз таких процессов. Натурные исследования (эксперимент) очень дороги и сложны, а иногда и просто невозможно. Моделирование позволяет исключить сложные и дорогостоящие эксперименты для исследования процессов сушки древесины [6]. К последнему стоит добавить, что экспериментальное изучение процессов обезвоживания затрудняется большим количеством видов древесины (клён, осина, дуб, берёза, пихта и т.п.) с различными характеристиками (линейные размеры, влажность, начальная температура, вид сруба и т.д.) [5].

Цель работы: математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса в условиях микроволнового и комбинированного радиационно-конвективного нагрева влажной древесины.

Постановка задачи

Физическая постановка

В начальный момент времени ($\tau=0$) древесная заготовка попадает в сушильную камеру, и нагревается за счет конвекции и излучения (в случае СВЧ-сушки нагрев осуществляется за счет комбинированного воздействия конвекции и микроволнового излучения). В результате инициируется процесс испарения влаги. Фронт испарения движется от поверхности вглубь заготовки. Соответственно формируется слой сухой древесины с низким коэффициентом теплопроводности. Промежуток времени от начала нагрева до момента полого высыхания (прохода фронта испарения по всему образцу), считается временем сушки ($\tau_{\text{сушки}}$).

Процесс «обезвоживания» рассматривается в рамках фронтальной модели испарения воды. Необходимо отметить, что процессы фазовых превращений

являются одними из самых сложных задач математической физики. Особенно это касается процессов испарения. Последнее связано с тем, что испарение влаги происходит в очень узкой (много меньше линейного размера заготовки) постоянно перемещающейся зоне. При этом стоит отметить, что испарение воды протекает с высоким эндотермическим эффектом (до $2,5 \cdot 10^6$ Дж/кг). Также необходимо сказать, что в процессе «обезвоживания» древесины формируется пористый древесный каркас с высоким термическим сопротивлением. Последний существенно затягивает процесс влагоудаления.

В случае СВЧ-воздействия возникает внутреннее тепловыделение. В результате возможно формирование сухого слоя внутри образца. Соответственно, возникает второй фронт испарения, который движется из глубины заготовки к поверхности.

Математическая постановка задачи, соответствующая выше изложенной физической модели состоит из следующей системы нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных:

- уравнение энергии для влажной древесины с учетом эндотермического эффекта испарения:

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) - \frac{Q_{isp}W_{isp}}{h_d} + q_{свч} \quad (1)$$

В случае СВЧ-нагрева в уравнение (1) добавляется экзотермический эффект тепловыделения: $q_{свч} = \varepsilon f t g \delta |E|^2$

- уравнение (1) решалось при следующих краевых условиях и замыкающих соотношениях:

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

$$x = 0: \frac{\partial T}{\partial x} = 0; \quad (2)$$

$$x = l: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T_e - T); \quad (3)$$

В случае комбинированного радиационно-конвективного нагрева в уравнение энергии $q_{свч} = 0$, при этом условие (3) преобразуется к следующему виду:

$$x = l: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \cdot (T_e - T) + \sigma \varepsilon (T_e^4 - T^4) \quad (4)$$

Система уравнений (1)-(4) математической физики решалась методом конечных разностей [7-9]. Задача «обезвоживания» вычислялась методом неявного выделения фронта испарения [10].

Исходные данные для системы (1)-(4) приведены в таблице 1.

Табл. 1.

	$C_p, \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$	$\lambda, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$
Дерево - береза	1250	0,15	600
воздух	4187	0,034	1
вода	1000	0,6	1000

Анализ полученных результатов

На рисунке 1 представлены зависимости времени полной сушки τ , с образца от температуры внешней среды T_e , К. для разных видов древесины. Начальная влажность заготовки составляла $\varphi=40\%$, толщина принималась 0,04 м, коэффициент теплоотдачи $\alpha=250 \text{ Вт/м}^2\text{К}$

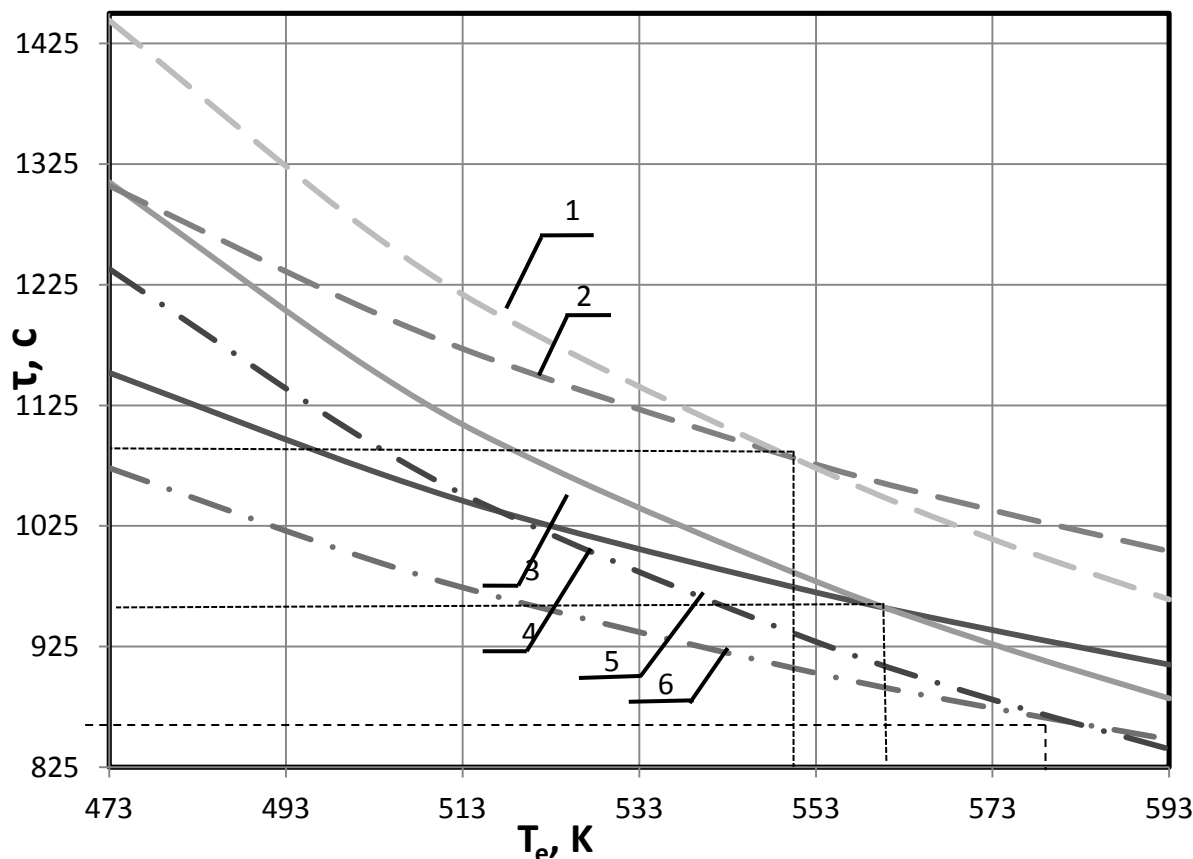


Рис. 1. Зависимость времени полной сушки τ , с от температуры внешней среды T_e , К в разных условиях нагрева: 1,2 – дуб, 2,3 – береза, 4,5 – пихта. 2,4,6 – СВЧ нагрев, 1,3,5 – радиационно-конвективный нагрев.

Анализ кривых приведенных на рисунке 1 показывает, что возможны 2 режима сушки: высокотемпературный и низкотемпературный. При относительно низких температурах внешней среды более выгодна комбинированная микроволново-конвективная сушка (малое значение τ по сравнению с радиационно-конвективным нагревом). При более высоких температурах сушильного агента более выгодной сушкой является радиационно-конвективное «обезвоживание». Например, для дуба при температуре окружающей среды выше 550 К, более предпочтительная радиационно-конвективная сушка. Скорее всего, это объясняется тем, что в случае высокотемпературного «обезвоживания» наибольшее воздействие на скорость сушки начинает оказывать радиационное воздействие внешней среды (лучистый тепловой поток). Однако стоит отметить, что повышение T_e может привести к возгоранию приповерхностного слоя древесной заготовки или (по крайней мере) к деформациям и термическому разрушению древесины.

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. Морозов Г.А. Микроволновые технологии в промышленности и сельском хозяйстве: современные тенденции и новые подходы / Материалы научно-техн. Конф. - Казань 2000.
4. Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Галяветдинов Н.Р., Валиев Ф.Г. Разработка энергосберегающих технологий сушки древесины в жидкостях //
5. Проблемы энергетики. – 2008. - № 11-12.
6. Расеев А.И Сушка древесины: учебное пособие. - СПб.: Издательство «Лань», 2014.
7. Лыков А.В. Сушка древесины. - М., 1937. – 471 с.
8. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности Учебное пособие. Издательство ТПУ: Томск, 2007.
9. Рыкунин С.Н. Технология деревообработки. Учебник для образовательных учреждений начального профессионального образования / С. Н. Рыкунин, Л. Н. Кандалина. Москва, 2007. Сер. Федеральный комплект учебников (3-е изд., стер.)
10. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Том 1, Москва: «Мир», 1991.
11. Самарский А.А. Моисеенко Б.Д. Экономическая схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Вычислительной математики и математической физики. – 1965. - №5.

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

В.А. Сергиенко
Томский политехнический университет
ЭНИН, ТПТ, гр.5БМ62

Аннотация. Представлены результаты математического моделирования тепловых режимов запорной арматуры тепловых сетей. Показано, что для запорной арматуры с относительно не большими условными проходами эквивалентную длину трубопровода можно сократить более чем в два раза.

Ключевые слова: запорная арматура, тепловые сети, тепловые потери
Известно [1], что тепловые потери тепловой сети слагаются из линейных (тепловых потерь участков трубопровода, не имеющих арматуры и фасонных частей) и местных потерь тепловой энергии (тепловых потерь фасонных частей, запорной арматуры, опорных конструкций, фланцев и т.д.)