

А
М 59

На правах рукописи

МИКОВ Андрей Александрович

**ТЕХНОЛОГИЯ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ
МОНИТОРИНГА ТЕКУЩЕЙ ВЛАЖНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ**

05.21.05 – Дровесиноведение, технология и оборудование деревопереработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет» (ФГБОУ ВО УГЛТУ)

Научный руководитель: **Шишкина Елена Евгеньевна**
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», профессор кафедры Автоматизации производственных процессов

Официальные оппоненты: **Зарипов Шакур Гаянович**
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», профессор кафедры Технологии лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств
Исаев Сергей Петрович
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», профессор кафедры Технологии лесопользования и ландшафтного строительства

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова» (ФГАОУ ВО САФУ)

Защита состоится «20» декабря 2017 г. в 13.00 на заседании диссертационного совета Д.212.281.02 при ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, к. 401

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (www.usfeu.ru).

Автореферат разослан «15» ноября 2017г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, доктор
технических наук, доцент

Шишкина

Шишкина Елена Евгеньевна

Научная библиотека
УГЛТУ
г. Екатеринбург

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Сушка пиломатериалов для всей деревообработки является основополагающим процессом. С одной стороны она в значительной степени определяет качество продукции из древесины, с другой стороны затраты на сушку могут составлять до 30 % стоимости сухих пиломатериалов. При этом факторами, в значительной степени определяющими качество сухих пиломатериалов являются структура и величина параметров режима сушки. Данные параметры на протяжении процесса сушки должны изменяться по величине в зависимости от текущей влажности древесины, что достаточно просто реализуется современными средствами автоматического управления.

Существующие методы непрерывного контроля влажности древесины в процессе ее сушки отличаются либо сложностью технической реализации и высокой стоимостью, либо невысокой точностью измерений, что приводит к ошибкам в значениях величин параметров режима сушки, и, следовательно, к снижению качества высушенных пиломатериалов.

Таким образом, создание технологии сушки пиломатериалов на основе эффективного мониторинга текущей влажности пиломатериалов является актуальной технической задачей.

Степень разработанности темы исследования.

Исследованиями и разработкой режимов сушки древесины, а также методов контроля влажности занимались известные российские ученые: Грум-Гржимайло В.Е., Соколов П.В., Серговский П.С., Акишенков С.И., Богданов Е.С., Шубин Г.С., Кротов Л.Н., Сергеев В.В., Мелехов В.И., Романов В.Г., Агапов В.П., Гороховский А.Г., Зарипов Ш.Г. и др.

Выполненные исследования позволили определить требования к качеству сушки пиломатериалов и эффективности процесса, требования к режимным параметрам, а также метрологические характеристики различных методов контроля влажности древесины в процессе её сушки.

Перспективным направлением является дальнейшее совершенствование как самих режимов сушки, так и методов и средств автоматического контроля и регулирования процессов.

Цель работы. Повышение эффективности и качества сушки пиломатериалов.

Предметом исследования являются пиломатериалы в процессе сушки.

Объектами исследования являются лесосушильные камеры и системы контроля параметров процесса сушки.

Научной новизной обладают:

1. Теоретическое и экспериментальное обоснование точности сушильно-весового метода контроля влажности древесины.
2. Теоретическое и экспериментальное обоснование метода мониторинга интегральной влажности древесины в штабеле пиломатериалов при сушке.
3. Экспериментально-статистические модели показателей эффективности и качества сушки пиломатериалов.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. При определении влажности древесины сушильно-весовым методом необходимо массу образца в абсолютно сухом состоянии определять как массу образца, отдающего с некоторой конечной интенсивностью влагу агенту сушки.
2. При реализации сушильно-весового метода определения влажности возможные колебания температуры в сушильном шкафу незначительно влияют на величину энергии связи влаги с древесиной, и, соответственно, на точность определения влажности.
3. При соблюдении необходимой точности взвешивания точность сушильно-весового метода полностью соответствует требованиям любой категории качества сушки. Метод может быть использован в качестве образцового.
4. Метод контроля интегральной влажности древесины по перепаду температур на штабеле метрологически более эффективен, чем кондуктометрический.

Достоверность сформулированных в диссертации теоретических положений, выводов и рекомендаций обеспечивается применением современных методов и средств научного поиска: применением теории тепломассообмена капиллярно-пористого тела, системам автоматизированного контроля температуры и влажности древесины и агента сушки; информационных технологий; обоснованным упрощением и корректными допущениями при разработке математических моделей; адекватностью регрессионных моделей, подтвержденной в соответствии с общепринятыми методиками; результатами производственных испытаний.

Теоретические, методологические и информационные основы исследования. Информационную базу исследования составили материалы научных исследований специалистов, научная, учебная и методическая литература, материалы периодических изданий, патентная информация, сведения из сети Интернет.

Исследования проводились с использованием принципов системного подхода, включающего методы теории сушки, теории вероятностей и математической статистики. Инструменты и приборы, выбранные для экспериментов, соответствовали по точности современным требованиям.

Теоретическая значимость работы заключается в получении новой информации, установлении закономерностей и формулировании требований к реализации сушильно-весового метода контроля влажности древесины и метода мониторинга интегральной влажности древесины в штабеле.

Практическая значимость состоит в экспериментальном доказательстве возможности и экономической целесообразности технологии сушки пиломатериалов на основе мониторинга текущей влажности древесины.

Основные научные и практические результаты, полученные лично автором:

1. Экспериментальное обоснование эффективности метода контроля влажности древесины по перепаду температур на штабеле;

2. Экспериментально-статистические модели параметров характеризующих эффективность и качество сушки пиломатериалов.
3. Анализ метрологических характеристик метода непрерывного мониторинга влажности древесины в процессе сушки.

Место проведения работы. Работа выполнена на кафедре Автоматизации производственных процессов Уральского государственного лесотехнического университета.

Апробация работы. Основные положения диссертации и результаты исследований докладывались на Всероссийской научно-технической конференции «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России». – Екатеринбург: УГЛТУ: 2015, 2017; Международной научно-технической конференции «Лесная наука в реализации концепции уральской инженерной школы: социально-экономические и экологические проблемы лесного сектора экономики» – Екатеринбург: УГЛТУ, 2017.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 8 работ, в том числе 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 6 разделов, выводов и рекомендаций, приложения, библиографического списка, включающего 211 наименования. Общий объем работы 143 страницы основного текста, 29 рисунков, 19 таблиц, 4 страницы приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертационной работы, сформулирована ее цель, научная новизна, научные положения, выносимые на защиту, структура и объем работы, а также ее реализация и апробация.

В первом разделе «Состояние вопроса и задачи исследований» проведен анализ существующих режимов сушки пиломатериалов, рассмотрены основные способы определения влажности древесины, в том числе в процессе её высушивания.

Проблемой точности определения влажности древесины занимались такие ученые как Н.С. Селюгин, И.В. Куликов, Н.Н. Чулицкий, Б.С. Чудинов, Г.С. Шубин, И.В. Кречетов, П.С. Серговский, Е.С. Богданов, А.Г. Гороховский и др.

Анализируя мнение основоположников отечественной науки о сушке древесины Н.С. Селюгина, П.С. Серговского и И.В. Кречетова можно выделить следующие основные факторы, определяющие качество сушки пиломатериалов:

- требования к качеству сушки
- контроль качества
- свойства древесины, как материала, подвергаемого сушке
- технология сушки

Руководящие технические материалы по камерной сушке древесины (РТМ) нормируют требования к качеству сушки, устанавливая при этом:

- категории качества сушки
- перечень показателей качества сушки, к которым относятся:

- а) соответствие средней влажности высушенных пиломатериалов в штабеле заданной конечной влажности;
 - б) величина отклонений влажности отдельных досок или заготовок от средней влажности пиломатериалов в штабеле;
 - в) перепад влажности по толщине пиломатериалов;
 - г) остаточные напряжения в высушенных пиломатериалах.
- значение показателей и условия их определения.

Весьма важным, определяющим качество сушки в смысле показателей, связанных с влажностью древесины и ее разбросом, является такой показатель как исходная влажность пиломатериалов (и ее колебания), которая, в свою очередь определяется влажностью древесины пиловочных бревен.

Таким образом, задачи контроля влажности при сушке обуславливаются требованиями к качеству пиломатериалов. Так как режимы сушки построены в зависимости от влажности высушиваемой древесины, необходимо измерять среднюю начальную влажность пиломатериалов, влажность высушиваемого штабеля в процессе сушки и его конечную влажность. Кроме того, для оценки качества сушки надо определять равномерность распределения влажности высушенных пиломатериалов по объему штабеля, измерять перепад влажности по толщине материала.

Для оценки качества сушки, определения требований к точности методов контроля влажности и влагомерам необходимо знать характер распределения влажности в партиях пиломатериалов.

Анализ литературных источников позволил сделать следующие выводы:

1. Эффективность сушки определяется, в основном, расходом энергии на 1 м³ пиломатериалов.
2. Из четырех нормируемых показателей качества сушки три, так или иначе, связаны с влажностью древесины.
3. Величина текущей влажности древесины определяет текущее значение температурно-влажностных параметров обрабатываемой среды в лесосушильной камере.
4. В этой связи постоянный эффективный мониторинг влажности сохнущей древесины представляет собой важную техническую задачу.
5. Анализ выявил следующие практические методы мониторинга влажности древесины в процессе сушки:
 - контроль влажности по усадке штабеля;
 - контроль влажности кондуктометрическими влагомерами;
 - контроль влажности по температуре древесины;
 - контроль влажности по массе древесины.
6. Наиболее перспективным методом мониторинга влажности древесины является метод контроля по перепаду температур на штабеле.

На основании изучения состояния проблемы сформулированы задачи исследования:

1. Теоретически и экспериментально определить метрологические характеристики сушильно-весового метода контроля влажности как образцового.
2. Теоретически и экспериментально исследовать метрологические характеристики метода по перепаду температур на штабеле.
3. Определить практическую пригодность метода контроля по перепаду температур на штабеле в конкретной технологии сушки пиломатериалов.
4. Определить технико-экономическую эффективность практической технологии сушки на основе мониторинга текущей влажности.

Во втором разделе «Общие методические положения» дано описание экспериментальной установки, методика проведения процесса и контроля показателей качества сушки, методика математической обработки результатов эксперимента и определения затрат энергии на сушку.

Методика экспериментальных исследований разработана для сушки пиломатериалов в полупромышленной камере с принудительной циркуляцией агента сушки, установленной в лаборатории сушки ОАО «УралНИИПДрев».

Технические характеристики ее приведены в таблице 1, а схема устройства – на рисунке 1.

Таблица 1 – Технические характеристики камеры

№ п/п	Наименование показателя	Значение
1.	Объем разовой загрузки (в условном пиломатериале), м ³	14,77
2.	Система нагрева агента сушки:	
	- тип – электрические калориферы	
	- максимальная мощность, кВт	45,0
	- максимальная температура в камере, °С	95,0
3.	Количество вентиляторных узлов	3
4.	Система контроля и автоматического управления:	
	- контроль и автоматическое регулирование температуры по сухому термометру	да
	- контроль и автоматическое управление степени насыщенности среды	да
	- контроль (и запись в непрерывном режиме) текущей влажности пиломатериалов	да
	- система оптимального управления сушкой	да

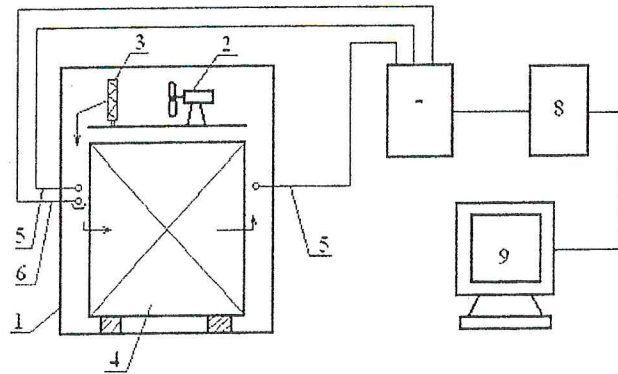


Рисунок 1 – Схема устройства полупромышленной лесосушильной камеры

По конструкции камера кирпичного исполнения. Внутри обшита листовым металлом со специальным полимерным покрытием, что препятствует его коррозии. В верхней части камеры (1) смонтированы вентиляторные узлы (2) и электрические калориферы (3). Все это вместе взятое обеспечивает поперечную циркуляцию нагретого воздуха через штабель пиломатериалов (4). Система контроля состояния агента сушки состоит из двух сухих (5) и одного смоченного (6) термометров сопротивления. Данная схема позволяет контролировать не только температуру и степень насыщенности среды, но и текущую влажность пиломатериалов. Управление состоянием воздушной среды производится путем открытия-закрытия приточно-вытяжных каналов, которое производится в автоматическом режиме. Также в автоматическом режиме (при помощи тиристорного регулятора) плавно регулируется электрическая мощность калориферов. Это позволяет при необходимости изменять температуру в камере в достаточно широких пределах.

Система автоматического управления камеры состоит из контроллера (7), адаптера сети (8) и компьютера (9), на экран которого в режиме реального времени могут быть выведены параметры среды и высушиваемого материала.

В третьем разделе «Исследование сушильно-весового метода контроля влажности древесины» дано обоснование требований к метрологическим характеристикам методов контроля влажности древесины, как в процессе ее сушки, так и по его окончании.

Влагосодержание твердого капиллярно-пористого тела определяется соотношением

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta m_i}{m_0} 100 = \sum_{i=0}^n \omega_i, \quad (1)$$

где m_0 – масса «скелета» тела, устойчивого к внешним воздействиям;

Δm_i – масса вещества в i -м агрегатном состоянии;

ω_i – влагосодержание по i -му агрегатному состоянию;

$i = 1$ – твердое вещество;

$i = 2$ – жидкость;

$i = 3$ – пар;

$i = 4$ – газ.

В частном случае все i -е компоненты могут быть одним по химическому составу веществом, прочность связи которого со скелетом тела значительно меньше прочности связи элементов скелета друг с другом.

Для древесины, например, соотношение (1) принимает вид

$$U = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \frac{\Delta m_{ij}}{m_0} 100 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \omega_{ij}, \quad (2)$$

где Δm_{ij} – масса j -го химического вещества в i -м агрегатном состоянии, участвующая в массообмене с внешней средой;

ω_{ij} – частное влагосодержание* по j -му химическому компоненту в i -м агрегатном состоянии;

m_0 – масса вещества, непосредственно не участвующего в массообмене;

n – число агрегатных состояний влаги;

k – число химических компонентов влаги.

Формой проявления наличия влаги в квазиоднородной системе, какой является капиллярно-пористое тело, в частности древесина, является массообмен с окружающей средой, убыль массы системы, переход вещества из системы во внешнюю среду. Перемещение вещества из системы во внешнюю среду наблюдается, если энергия внутренних связей компонентов системы меньше, чем суммарная кинетическая энергия этих компонентов плюс энергия внешних воздействий, т.е. воздействий со стороны внешней среды, стремящихся выделить эти компоненты из системы.

Следовательно, критерием, определяющим разделение системы на влагу и сухое вещество, является в общем случае не химический состав и не агрегатное состояние, а энергия связи.

Известно, что скорость убыли массы образца при его сушке определяется соотношением:

$$J = \alpha (\mu_0 - \mu_{ac}), \quad (3)$$

где μ_0 – химический потенциал наиболее прочно связанного вещества, которое входит в понятие «влага»;

μ_{ac} – химический потенциал агента сушки;

α – коэффициент пропорциональности.

Химический потенциал в гигроскопической области по абсолютной величине тождественно равен энергии связи влаги с абсолютно сухим веществом:

$$\varepsilon = |\mu|,$$

где ε – энергия связи.

Из (3) следует:

$$\mu_0 = \frac{J}{\alpha} + \mu_{ac} \quad (4)$$

Для параметров воздуха в лаборатории согласно ГОСТ 16483.0 – 78

$$\mu_{ac} = -13,4 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$$

Для определения величины энергии связи, условно соответствующей влажности равной нулю необходимо решить уравнение (4), в котором помимо μ_0 неизвестным является также α .

Для его решения сделаем следующие допущения:

1. Химический потенциал μ_0 полностью определяется величиной влажности образца (в данном случае $U \approx 0$).

2. Изменением величины влагообмена при $\mu_0 = \text{const}$ и незначительном изменении μ_{ac} можно пренебречь.

3. При незначительных изменениях температуры агента сушки (в пределах 5 %) J меняется по линейному закону.

В результате получим $\mu_0 = 1$ кДж/моль, что вполне соответствует экспериментальным данным Г.С. Шубина – 1,5 кДж/моль при $t = 20$ °С и $W = 0,1$ %.

Сформулированы требования к точности метода контроля высушенной древесины.

На основании требований РТМ и согласно теории ошибок получены уравнения для оценки диапазонов работы методов.

1. Определения средней конечной влажности:

$$W = W_{нк} \pm 1,1\delta W_{нд} \quad (5)$$

2. Определения послойной влажности:

$$W_{нсл, \max} = (W_{нк, \max} + \delta W_{нд}) + 0,55\delta W_T \quad (6)$$

$$W_{нсл, \min} = (W_{нк, \min} - \delta W_{нд}) - 0,55\delta W_T \quad (7)$$

где $\delta W_{нд}$ – допустимое отклонение конечной влажности в партии от среднего;

δW_T – допустимый перепад влажности по толщине.

Расчетные значения параметров метода контроля влажности древесины приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Общие требования к методу контроля влажности древесины при сушке пиломатериалов

Допустимая среднеквадратическая погрешность, S_w , %	Диапазон определения влажности, %
0,125	1,8 – 22,75

Определены требования к точности взвешивания, при реализации сушильно-весового метода контроля получено уравнение:

$$S_m = 100 \frac{m_w}{(100 + W)^2} \cdot S_w \quad (8)$$

где S_m – допустимая среднеквадратическая погрешность определения массы влаги и массы сухого древесного вещества;

S_w – допустимая среднеквадратическая погрешность определения влажности W образца влажной древесины массой m_w .

Произведенные далее расчеты позволяют констатировать следующее (таблица 3):

- точность взвешивания 0,1 г, которая регламентирована ГОСТ 16588 – 91 позволяет получить в какой-то степени приемлемую точность определения влажности древесины только для секций влажности крупных сечений пиломатериалов. При этом точность оказывается приемлемой только для II – III категории качества сушки;
- точность взвешивания 0,01 г, которая была регламентирована ГОСТ 16588 – 79, позволяет получить требуемую I категорией качества сушки точность определения влажности для большинства сечений пиломатериалов. Исключение составляют достаточно мелкие сечения при толщинах пиломатериалов 16, 19 и 22 мм;
- точность определения влажности для пиломатериалов мелких сечений возможна за счет повышения массы секций влажности указанных сечений.

Таблица 3 – Точность определения влажности древесины сушильно-весовым методом в зависимости от точности взвешивания

№ п/п	Сечение, мм	Требуемая точность взвешивания (при $S_w = 0,125$ %)	Точность определения влажности древесины, %, при			
			$S_m = 0,1$ г		$S_m = 0,01$ г	
			S_w , %	ΔW , %	S_w , %	ΔW , %
1	16 × 75	0,00375	3,33	± 40,0	0,333	± 4,0
2	19 × 100	0,0059	2,12	± 25,0	0,212	± 2,5
3	22 × 125	0,0086	1,45	± 17,5	0,145	± 1,75
4	25 × 150	0,01	1,25	± 15,0	0,125	± 1,5
5	32 × 150	0,0156	0,8	± 9,63	0,08	< ± 1,5
6	40 × 150	0,019	0,66	± 7,95	0,066	< ± 1,5
7	50 × 200	0,032	0,39	± 4,7	0,039	< ± 1,5
8	60 × 225	0,0432	0,29	± 3,49	0,029	< ± 1,5
9	75 × 250	0,06	0,21	± 2,53	0,021	< ± 1,5

Подтверждено, что рекомендуемое РТМ количество секций влажности (для ее определения сушильно-весовым методом) при метрологических характеристиках применяемых методов является достаточным.

Проведенные экспериментальные исследования позволяют заключить следующее:

- точность сушильно-весового метода, характеризующаяся среднеквадратическим отклонением влажности, высока и полностью соответствует требованиям любой категории качества сушки;

- влияние длины образца на точность определения влажности древесины статистически не существенно.

На рисунке 2 приведены зависимости расхождения в определении значений влагосодержания от площади сечения образца и точности взвешивания.

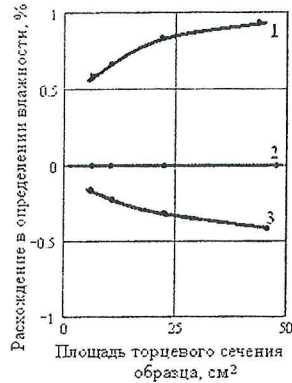


Рисунок 2 – Расхождения в определении влажности древесины

Порода — сосна.

Размеры торцевого сечения образцов:

10 × 60 мм; 16 × 75 мм; 19 × 100 мм; 32 × 150 мм.

Толщина образцов — 10 мм.

Точность взвешивания: 1 – 0,002 г; 2 – 0,01 г; 3 – 0,02 г.

Средняя влажность древесины при точности взвешивания 0,01 г составляет 7,2 %

Анализируя полученные зависимости, можно сделать следующие выводы.

1. Точность взвешивания весьма существенно влияет на получаемые значения влажности. Так, при средней влажности 7,2 % (при точности взвешивания, равной 0,01 г) повышение точности взвешивания до 0,002 г увеличивает получаемые значения влажности на 0,5 – 0,9 %. Снижение точности взвешивания вдвое (против 0,01 г) занижает получаемые значения влажности на 0,2 – 0,4 %.

2. Размеры образца (площадь торцевого сечения) также достаточно сильно влияют на величину определенной влажности. Причем увеличение сечения образца увеличивает расхождения в определении влажности.

3. Влияние точности взвешивания образцов на определяемое значение влажности укладывается в доверительный интервал среднего арифметического значения влажности при качестве сушки, соответствующем II категории (РТМ).

Таким образом, экспериментально подтверждено, что при определении влажности пиломатериалов сушильно-весовым методом точность взвешивания секций влажности должна быть не более 0,01 г.

В четвертом разделе «Исследование метода мониторинга интегральной влажности древесины в штабеле пиломатериалов при сушке» разработан метод контроля влажности древесины в процессе ее сушки.

В качестве метода контроля выбран метод, основанный на определении разности температур агента сушки на входе в штабель и выходе из него (рисунок 3).

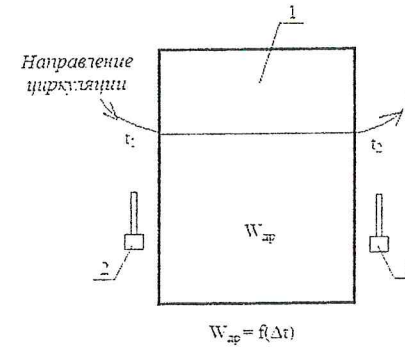


Рисунок 3 – Схема контроля влажности древесины по величине перепада температур на штабеле

1 – штабель пиломатериалов;

2, 3 – датчики температуры

В основе практической реализации метода лежит выведенное В.П. Агаповым выражение:

$$\Delta t = -B \cdot \frac{\rho_6 \cdot S_2 (W - W_p) \cdot (d + 1000)}{100 \rho_1 \cdot \omega_1 \cdot T \cdot \left(\frac{S_1}{\pi^2 a_m} + \frac{1}{2\alpha_m} \right)}, \quad (9)$$

где ρ_6 – базисная плотность древесины, кг/м³;

S_2 – ширина сортимента, м;

S_1 – толщина сортимента, м;

T – толщина прокладки, м;

ρ_1 – плотность сушильного агента на входе в штабель, кг/м³;

ω_1 – скорость циркуляции сушильного агента, м/с;

a_m – коэффициент влагопроводности древесины, м²/с;

α_m – коэффициент влагообмена, м/с;

d – влагосодержание сушильного агента на входе в штабель, г/кг;

Δt – разность температуры сушильного агента на входе и выходе из штабеля, °С;

B – коэффициент.

В таблице 4 приведены данные метрологической оценки данного метода контроля влажности древесины.

Таблица 4 – Погрешность определения влажности древесины по перепаду температур на штабеле

Влажность древесины, %	$\Delta W = \sum_{i=1}^{12} \Delta W_i$, %	$\Delta W^* = \sqrt{\sum_{i=1}^{12} \Delta W_i^2}$
8	1,36	0,66
25	2,49	1,22
35	4,97	2,29

Примечание: ΔW – предельная, а ΔW^* – среднеквадратическая погрешность определения влажности древесины.

Проведенная экспериментальная проверка подтвердила данные теоретических исследований (рисунок 4) в отношении достаточной точности определения влажности древесины при сушке пиломатериалов.

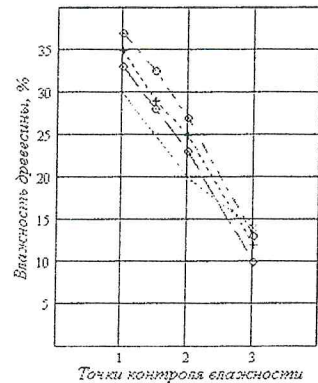


Рисунок 4 – Метрологические характеристики методов контроля влажности древесины
 ++++ - сушильно-весовой метод;
 - - метод по перепаду температур на штабеле;
 ooo - доверительный интервал для сушильно-весового метода

Анализируя результаты эксперимента можно заключить, что:

- экспериментально полученные данные об ошибке определения влажности свидетельствуют о том, что характер изменения ошибки от абсолютного значения влажности, полученный аналитическим путем подтверждается: при уменьшении влажности ошибка по абсолютной величине уменьшается;

- при величине влажности древесины более 20 %, величина ее, определенная по перепаду температур на штабеле оказывается ниже, чем влажность, полученная сушильно-весовым методом. А при влажности, более низкой (ниже 15 %) сушильно-весовой метод дает значения влажности примерно на 2 % ниже, чем метод по перепаду температур на штабеле;

- в целом, метрологические характеристики метода, полученные экспериментально, несколько хуже, чем аналитические, особенно для малых значений влажности.

Из рисунка 3 следует, что с учетом величины доверительного интервала для значений влажности древесины, полученных сушильно-весовым методом, метод по перепаду температур на штабеле дает меньше отклонения, чем от средних значений: от 1,1 до 3 %.

В то же время при измерении влажности в процессе сушки кондуктометрическим методом среднеквадратическое отклонение влажности составляет

- при влажности древесины 8 – 10 % - 1,7 % (т.е. полное отклонение $\pm 5,1$ %);
 - при влажности древесины 17 – 30 % - 3,14 % (т.е. полное отклонение $\pm 9,42$ %).

По мнению Е.С. Богданова для контроля влажности древесины высушенной по I категории качества $\sigma_{\text{вн}} = \pm 0,4 \div 0,5\%$.

Для предложенного метода при измерении влажности по окончании сушки $\sigma_{\text{вн}} = \frac{\Delta}{3}$, и составляет менее $\pm 0,4\%$.

С учетом всего изложенного метрологические характеристики метода контроля влажности древесины по перепаду температур на штабеле можно считать вполне удовлетворительными.

В пятом разделе «Исследование технологии сушки пиломатериалов на основе температурного метода контроля текущей влажности древесины» проведен вычислительный эксперимент с целью апробации температурного метода контроля влажности древесины при бесступенчатом режиме сушки.

Эксперимент проводился на полупромышленной камере, установленной в ОАО «УралНИИПДрев».

Цель эксперимента – апробация температурного метода контроля влажности древесины.

В качестве основного эксперимента был реализован план типа В₃. Схема проведения эксперимента приведена на рисунке 5.

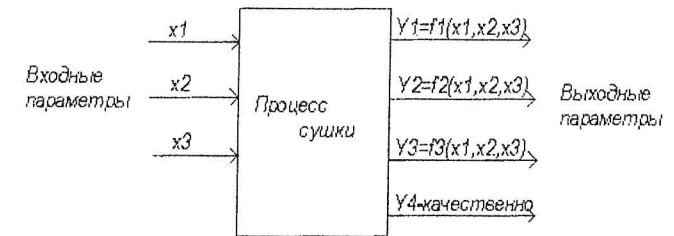


Рисунок 5 – Схема проведения эксперимента

Постоянные факторы при проведении эксперимента, а также их значения приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Значение постоянных факторов при проведении эксперимента

№ п/п	Наименование фактора	Значение фактора
1.	Порода древесины	Сосна
2.	Размеры пиломатериалов	
	- толщина	50 мм
	- ширина	125 – 175 мм
	- длина	6,0 м
3.	Вид пиломатериалов	Обрезные
4.	Объем загрузки камеры	15,8 м ³
5.	Начальная влажность древесины	60 – 70 %
6.	Конечная влажность древесины	8 %
7.	Тип режима сушки	бесступенчатый

Переменные факторы при проведении вычислительного эксперимента:
 x_1 – степень насыщенности среды в начале сушки (φ_n);

x_2 – степень насыщенности среды в конце сушки (φ_k);
 x_3 – температура агента сушки по сухому термометру (t_c).

Выходными параметрами вычислительного эксперимента являлись:

$T_{\text{суш}}$ (y_1) – продолжительность сушки;
 S (y_2) – среднее квадратическое отклонение влажности пиломатериалов;
 N (y_3) – расход энергии на сушку;
 σ (y_4) – внутренние напряжения в пиломатериалах после сушки.

Результаты реализации эксперимента согласно матрице плана B_3 представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Значения выходных параметров эксперимента при реализации плана B_3

№ п/п	x_1	x_2	x_3	Y_1	Y_2	Y_3	\tilde{Y}_4
1	+	+	+	110	0,89	2,508	I*
2	-	+	+	108	0,92	2,480	I
3	+	-	+	106	0,94	2,452	I
4	-	-	+	102	0,98	2,398	II
5	+	+	-	150	0,68	3,027	I
6	-	+	-	146	0,78	2,971	I
7	+	-	-	142	0,80	2,929	I
8	-	-	-	150	0,75	3,055	II
9	+	+	0	135	0,87	2,817	I
10	-	+	0	132	0,89	2,796	I
11	+	-	0	137	0,85	2,802	I
12	-	-	0	128	0,9	2,834	I
13	+	+	+	120	0,93	2,678	I
14	-	+	-	130	0,72	2,761	I

Примечание: * I, II – категории качества сушки по величине внутренних напряжений.

В результате обработки эксперимента получены следующие функции отклика для выходных параметров эксперимента:

- Продолжительность сушки

$$\hat{Y}_1 = 132 + 2,3x_2 - 17,2x_3 + 1,4x_1^2 - 7,1x_3^2 + 1,3x_1x_2 + 1,3x_1x_3, \quad (10)$$

- Среднее квадратическое отклонение влажности пиломатериалов

$$\hat{Y}_2 = 0,9 - 0,01x_1 - 0,03x_2 + 0,1x_3 + 0,01x_1^2 - 0,05x_3^2 - 0,02x_1x_2, \quad (11)$$

- Расход энергии на сушку

$$\hat{Y}_3 = 1,8 + 0,01x_2 - 0,2x_3 - 0,1x_3^2 + 0,02x_1x_2 + 0,02x_1x_3 + 0,02x_2x_3, \quad (12)$$

Все модели адекватны и эффективны.

Минимальные значения выходных параметров (при соответствующих входных) после применения процедуры Given – Minimize ППП “Mathcad – 14” представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Минимальные значения выходных параметров эксперимента

$Y_1 = 118$ час	$Y_2 = 0,78$ %	$Y_3 = 2,469$ ГДж/м ³
$x^* = \begin{vmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \end{vmatrix}$	$x^* = \begin{vmatrix} -1 \\ 1 \\ -1 \end{vmatrix}$	$x^* = \begin{vmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{vmatrix}$

В результате решения компромиссной задачи методом условного центра масс, получим:

$$Y^{**} = \begin{vmatrix} 145 \\ 0,9 \\ 2,52 \end{vmatrix} \quad \text{при} \quad x^{***} = \begin{vmatrix} -0,323 \\ 0,318 \\ -0,318 \end{vmatrix}$$

Натуральные значения переменных, соответствующих решению компромиссной задачи:

$$\varphi_n^{**} = 0,776$$

$$\varphi_k^{**} = 0,316$$

$$t_c^{**} = 77,1^{\circ}\text{C}$$

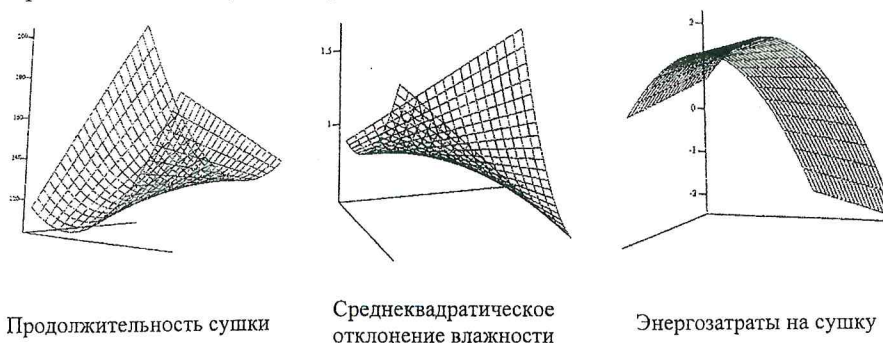
Для наглядной иллюстрации полученных результатов подставим в (10), (11) $x_3 = 0,318$ ($77,1^{\circ}\text{C}$), а в (12) $x_1 = -0,323$ ($0,766$). Получим следующие выражения функции отклика для выходных параметров процесса:

$$\hat{Y}_1 = 125,9 + 0,4x_1 + 2,3x_2 + 1,4x_1^2 + 1,3x_1x_2, \quad (13)$$

$$\hat{Y}_2 = 0,9 - 0,01x_1 - 0,03x_2 + 0,01x_1^2 - 0,02x_1x_2, \quad (14)$$

$$\hat{Y}_3 = 1,8 + 0,1x_2 - 0,2x_3 - 0,1x_3^2 + 0,02x_1x_2. \quad (15)$$

На рисунке 6 приведены зависимости выходных параметров процесса сушки от входных. На всех графиках прослеживается наличие четко выраженного минимума поверхностей отклика.



Продолжительность сушки

Среднее квадратическое отклонение влажности

Энергозатраты на сушку

Рисунок 6 – Зависимости выходных параметров процесса сушки от входных

A-1829

Для проведения сравнительного анализа полученных результатов эксперимента был проведен ряд контрольных сушек пиломатериалов по нормативным режимам.

Сравнение результатов оптимизации режимов сушки полученных с применением температурного метода контроля с результатами аналогичного эксперимента, но проведенного с контролем кондуктометрическим методом показал их достаточно близкое совпадение.

В ходе эксперимента температурный метод контроля текущей влажности древесины показал высокие метрологические характеристики.

В практическом применении температурный метод проще и надежнее кондуктометрического.

В шестом разделе «Оценка технико-экономической эффективности использования результатов работы» проведен сравнительный расчет затрат на сушку пиломатериалов режимами, рекомендуемыми РТМ и предлагаемыми нами режимами на основе мониторинга текущей влажности древесины.

Данная оценка проводилась для трёх лесосушильных камер, разработанных и смонтированных ОАО «УралНИИПДрев» на ООО «Серовский шпалопропиточный завод».

Расчет затрат тепловой и электрической энергии по предлагаемой технологии по сравнению с существующей показал, что экономия энергии составит порядка 240 руб/м³ высушиваемого пиломатериала.

Кроме того, экономия от снижения брака при этом составит 115 руб/м³ высушиваемого пиломатериала.

Суммарная годовая экономия от внедрения технологии сушки пиломатериалов на основе мониторинга текущей влажности древесины при годовом объеме сушки 1800 м³ составляет около 640 тыс. рублей.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Величина влажности древесины в процессе сушки определяет текущее значение температурно-влажностных параметров обрабатываемой среды в лесосушильной камере, т.е. режима сушки.
2. Точность сушильно-весового метода контроля влажности древесины (при соблюдении обоснованных требований к точности взвешивания) является абсолютно достаточной. Метод может быть использован в качестве образцового.
3. Контроль влажности древесины непосредственно в процессе ее сушки по разности температур на штабеле является эффективным за счет простоты технической реализации. Полная ошибка определения влажности при этом зависит от свойств древесины, геометрических параметров высушиваемых сортиментов и параметров агента сушки. Метрологические характеристики метода достаточно высоки (2 – 5 %), что позволяет рекомендовать метод для практического использования.

4. Экспериментальные исследования реальных процессов сушки подтвердили пригодность метода мониторинга интегральной влажности штабеля пиломатериалов для практического применения в условиях производства.
5. Оценка технико-экономической эффективности использования результатов работы показала, что внедрение разработанного метода мониторинга позволяет снизить себестоимость сушки приблизительно на 20 %, причем за счет снижения брака на 9 %.

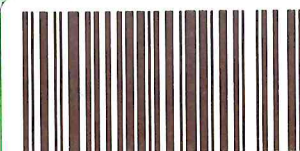
ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Гороховский А.Г. Совершенствование системы требований к качеству сушки пиломатериалов / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, Е.В. Старова, А.А. Миков, С.В. Булатов // Системы. Методы. Технологии. № 2 (34). Братск, 2017. С. 133 – 138.
2. Гороховский А.Г. Теоретическое исследование сушильно-весового метода контроля влажности древесины / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, Е.В. Старова, А.А. Миков, С.В. Булатов // Системы. Методы. Технологии. № 3 (35). Братск, 2017. С. 107 – 112.

В сборниках докладов на конференциях

3. Шишкина Е.Е. О влиянии категории режима на затраты тепловой энергии на сушку пиломатериалов / Е.Е. Шишкина, Е.В. Сливина, А.А. Миков // Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов и конкурса по программе «Умник». Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. С. 13 – 14.
4. Шишкина Е.Е. Пути снижения энергозатрат на сушку пиломатериалов / Е.Е. Шишкина, Е.В. Сливина, А.А. Миков // Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов и конкурса по программе «Умник». Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. – С. 23 – 25.
5. Гороховский А.Г. Анализ способов удаления влаги из древесины / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, Е.В. Старова, А.А. Миков // Лесная наука в реализации концепции уральской инженерной школы: социально-экономические и экологические проблемы лесного сектора экономики: матер. XI Междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2017. С. 150 – 152.
6. Гороховский А.Г. Анализ структуры энергозатрат на камерную сушку пиломатериалов / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, Е.В. Старова, А.А. Миков // Лесная наука в реализации концепции уральской инженерной школы: социально-экономические и экологические проблемы лесного сектора экономики: матер. XI Междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2017. С. 153 – 155.



000057191

7. Шишкина Е.Е. Исследование метода оперативного контроля интегральной влажности древесины в штабеле пиломатериалов при сушке / Е.Е. Шишкина, Е.В. Старова, А.А. Миков // Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России». – Екатеринбург: УГЛТУ, 2017. С. 89 – 91.
8. Шишкина Е.Е. Нормативные методы контроля показателей качества сушки пиломатериалов / Е.Е. Шишкина, Е.В. Старова, А.А. Миков // Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России». – Екатеринбург: УГЛТУ, 2017. С. 92 – 93.

Просим принять участие в работе диссертационного Совета или прислать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, УГЛТУ, диссертационный совет Д.212.281.02, e-mail: d21228102@yandex.ru

Подписано в печать 25.10.2017. Объем 1 авт.л. Заказ № 216. Тираж 100 экз.
620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Отдел оперативной полиграфии.