

СТАРОВА Елена Владимировна

**ТЕХНОЛОГИЯ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ РЕЖИМАМИ
ОПТИМИЗИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ**

05.21.05 – Дреvesиноведение, технология и оборудование деревопереработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург 2018

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
Рублева Ольга Анатольевна
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», доцент кафедры машин и технологии деревообработки

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

Защита состоится «25» апреля 2018 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 «20» марта 2018г.

A-1837

Ученый секретарь
диссертационного совета, доктор
технических наук, доцент



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.

Удаление влаги из древесины в процессе сушки представляет собой достаточно сложный физико-химический процесс, сопровождающийся тепло- и массообменом, изменением размеров и формы сортиментов древесины, а также всего комплекса параметров, определяющих её качество.

Определяющим звеном при этом является технология сушки, развитие которой в настоящее время идёт по двум направлениям:

1. Совершенствование оборудования для сушки.
2. Совершенствование режимов сушки на основе современных методов компьютерного моделирования и оптимизации процессов;

Применяемая в отечественной практике сушки система трёхступенчатых режимов далека от совершенства и требует существенной корректировки. Особо важным это становится в связи с постоянно повышающимися требованиями к качеству продукции.

Поэтому одним из возможных направлений совершенствования технологии сушки является применение таких режимов сушки, которые с одной стороны, были бы лишены недостатков существующих режимов, а с другой стороны могли быть сравнительно просто реализованы с помощью современных технических средств автоматизированного управления лесосушильными камерами.

Таким образом, создание технологии сушки древесины, позволяющей получать высококачественную продукцию, является актуальной задачей, имеющей большой научный и практический интерес.

Степень разработанности темы исследования.

Исследованиями процессов сушки древесины занимались такие известные российские ученые как Пейч Н.Н., Соколов П.В., Кречетов И.В., Лыков А.В., Серговский П.С., Базаров С.М., Глухих В.Н., Пятакин В.И., Акишенков С.И., Федяев А.А., Богданов Е.С., Петровский А.М., Шубин Г.С., Мингазов М.Г., Мазяк З.Ю., Скуратов Н.В., Пухов А.К., Уголев Б.Н., Кротов Л.Н., Сергеев В.В., Мелехов В.И., Гороховский А.Г., Зарипов Ш.Г. и др.

Выполненные исследования позволили определить требования к режимным параметрам и обосновать основные направления совершенствования технологии сушки пиломатериалов.

Наиболее перспективным направлением является совершенствование режимов сушки, особенно, в направлении повышения качества продукции.

Цель работы. Повышение качества сушки пиломатериалов.

Объектами исследования являются процессы тепломассообмена древесины при ее сушке.

Предметом исследования являются технологические режимы сушки пиломатериалов.

Научной новизной обладают:

1. Обоснование требований к качеству сушки пиломатериалов.
2. Методика построения режимов сушки пиломатериалов с заранее заданным качеством.
3. Модели процесса сушки пиломатериалов бесступенчатыми режимами оптимизированной структуры (БОС-режимами).

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Качественные показатели высушенной древесины в значительной степени определяются параметрами режима сушки, которые могут быть оптимизированы.
2. Бесступенчатые режимы оптимизированной структуры (БОС-режимы) позволяют эффективно управлять процессом влагоудаления из древесины.
3. Приведение значений влажности древесины в изделиях в соответствие с температурно-влажностными условиями эксплуатации позволяет существенно (в 10 – 15 раз) снизить количество брака мебели и столярно-строительных изделий.

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 с использованием вычислительной среды высокого уровня; 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, термодинамики, 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 рациональным значениям величины влажности древесины в изделиях в зависимости от температурно-влажностных условий эксплуатации, а также формирование структуры и величины технологических параметров, характеризующих БОС-режимы сушки пиломатериалов.

Практическое значение имеют:

1. Технологические параметры БОС-режимов сушки пиломатериалов.

2. Программное обеспечение для компьютерного моделирования процессов сушки пиломатериалов.

Внедрение разработанной технологии в производство позволит:

- исключить операции по проведению влаготеплообработки пиломатериалов;
- снизить расход тепловой энергии на сушку;
- обеспечить высокое качество сушки пиломатериалов.

Основные научные и практические результаты, полученные лично автором:

1. Численные значения параметров режимов для различных категорий качества сушки пиломатериалов.
2. Модели процесса сушки пиломатериалов БОС-режимами.

Место проведения работы. Работа выполнена на кафедре «Автоматизации производственных процессов» Уральского государственного лесотехнического университета, промышленная апробация проведена в лаборатории сушки ОАО «УралНИИПДрев».

Апробация работы. Основные положения диссертации и результаты исследований докладывались на Всероссийской научно-технической конференции «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России». – Екатеринбург: УГЛТУ, 2013, 2015, 2017; Международной научно-технической конференции «Лесотехнические университеты в реализации концепции возрождения инженерного образования: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса» - Екатеринбург: УГЛТУ, 2015; 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 13 работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 патент РФ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, выводов и рекомендаций, приложений, библиографического списка, включающего 234 наименования. Общий объём работы 163 страницы, в том числе 3 страницы приложения, 21 рисунок, 65 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первом разделе «Состояние вопроса и задачи исследований» проведен обзор системы требований к качеству сушки пиломатериалов.

Проблемой повышения качества сушки древесины занимались такие известные ученые как Грум-Гржимайло В.Е., Соколов П.В., Кречетов И.В.,

Серговский П.С., Расев А.И., Гороховский А.Г., Федяев А.А., Богданов Е.С., Шубин Г.С., Скуратов Н.В., Кротов Л.Н., Сергеев В.В., Мелехов В.И. и др.

Требования к качественным показателям сушки древесины существенно менялись на протяжении XX века. Так, в 30 – 40-е годы древесина была авиационным материалом, к качеству сушки которого предъявлялись высочайшие требования. Однако к концу 40-х годов древесина перестала быть авиационным материалом, в связи с чем требования к качеству продукции деревообработки существенно снизились. Качество сушки в этом отношении не явилось исключением.

В 40-е–60-е годы проводилась большая работа, связанная с исследованием влияния качества сушки на взаимозаменяемость в деревообработке, в частности в отношении допустимого колебания конечной влажности древесины. В результате проведенных исследований были изданы нормативные документы, регламентирующие требования к качественным показателям сушки.

Последним по времени появления нормативным документом были «Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины» (РТМ), изданные в 1985 г. ЦНИИМОД, в котором, на первый взгляд, даны простые, понятные, исчерпывающие определения категорий и показателей качества сушки пиломатериалов, а также методика их определения. Однако требования к качеству сушки, особенно диапазонов конечных значений влажности, соответствующих определенным категориям качества существенно снижены. С целью увеличения производительности сушильных камер и упрощения ручного управления ими была изменена структура режимов сушки. Уменьшение количества ступеней режима, привело к тому, что относительное изменение величин параметров режимов при переходе со ступени на ступень стало весьма существенным. При резком увеличении температуры агента сушки и одновременном снижении его влагосодержания происходит не менее резкое изменение соотношения между внешним и внутренним влагообменом древесины, что отрицательным образом сказывается на качестве сушки.

В современных условиях, требования к качеству деревообработки, предъявляемые потребителями, достаточно высоки. Поскольку качество изделия из древесины зависит, прежде всего, от качества сушки пиломатериалов, то на сегодняшний день очевидно актуальность задачи обоснования требований к сушке с целью обеспечения качественных показателей, полностью отвечающих требованиям потребителей продукции.

Таким образом, анализ состояния вопроса позволил сформулировать задачи исследования:

1. Разработать научно-обоснованные требования к качеству сушки пиломатериалов.
2. Провести аналитические исследования кинетики и динамики сушки древесины существующими и БОС-режимами путём компьютерного моделирования процесса сушки.
3. Провести экспериментальную проверку технологии сушки БОС-режимами.
4. Определить экономическую эффективность БОС-режимов.

Во втором разделе «Исследование влияния разброса влажности сухих пиломатериалов на качество продукции деревообработки» рассмотрены к влажности древесины, в зависимости от условий эксплуатации.

Согласно РТМ сушку пиломатериалов можно условно подразделить на два типа: сушка пиломатериалов до транспортной влажности и сушка пиломатериалов до эксплуатационной влажности изделий.

Причем, в настоящее время основное количество древесины, подвергнутое сушке второго типа, используется для изготовления мебели (бытовой, кухонной, детской) и столярно-строительных изделий, главным образом это окна, двери, лестницы, стеновые панели, покрытия пола, несущие и ограждающие клееные деревянные конструкции и т.п.

Анализ требований стандартов (ГОСТ, ТУ) к влажности древесины в вышеупомянутых изделиях показывает, что требования, как к средним величинам влажности, так и ее допускаемым отклонениям довольно существенно отличаются от требований к качеству сушки, регламентированных РТМ.

Поэтому, основной целью настоящего аналитического исследования является определение рациональных значений влажности древесины и ее допустимых колебаний в партиях сухих пиломатериалов, предназначенных для изготовления мебели и столярно-строительных изделий.

Основным требованием при этом было соблюдение допуска на размеры сопрягаемых деталей согласно ГОСТ 6449.1 – 82 при возможных изменениях температурно-влажностных параметров в условиях эксплуатации изделий.

В основе методики исследований лежат следующие положения:

1. Для древесины, как гигроскопического материала полная величина допуска на размер определяется как:

$$\delta_n = \delta_m + \delta_{\beta\lambda}, \quad (1)$$

где δ_n – полный допуск;

δ_m – допуск при механической обработке;

$\delta_{\beta\lambda}$ – допуск на изменение размера детали при колебаниях равновесной влажности.

2. Полный допуск на механическую обработку назначался в пределах $4S$ (где S – среднее квадратическое отклонение).

3. Фактическое изменение линейных размеров деталей, изготовленных из древесины различных пород, при изменении их влажности принималось по данным ВИАМ и ВНИИдрев, которые учитывают как циклическое изменение относительной влажности воздуха в диапазоне 40 – 80 %, так и гистерезис поглощения для различных пород древесины.

4. Допускаемое изменение влажности древесины для тех или иных деталей определялось по формуле:

$$\Delta W_{\text{доп}} = \frac{\delta_{\text{вн}}}{\delta_{\text{вн}}(1\%)}, \quad (2)$$

где $\delta_{\text{вн}}$ – допуск на изменение размера вследствие изменения влажности детали;

$\delta_{\text{вн}}(1\%)$ – изменение размера детали при изменении ее влажности на 1 %.

5. Стандартные условия эксплуатации изделий из древесины определялись согласно РТМ (таблица 1).

6. Значения допускаемых значений влажности определялись из следующих выражений:

$$W_{\text{доп. min}} = W_{\text{рmax}} - \Delta_c - \Delta W_{\text{доп}} \quad (3)$$

$$W_{\text{доп. max}} = W_{\text{рmin}} + \Delta W_{\text{доп}} \quad (4)$$

7. Детали, имеющие влажность, находящуюся за пределами диапазона

$$W_{\text{доп. min}} \leq W \leq W_{\text{доп. max}} \quad (5)$$

считались браком.

Таблица 1 – Стандартные условия эксплуатации изделий из древесины

| № п/п | Наименование | Температурно-влажностные условия | Равновесная влажность, % | | |
|-------|--|---|--------------------------|------|------------------|
| | | | min | max | Диапазон |
| 1. | Отапливаемые помещения | $t = 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ $\varphi = 0,4 \pm 0,1$ | 6,1 | 9,4 | $7,75 \pm 1,65$ |
| 2. | Условия повышенных колебаний температуры и относительной влажности воздуха | $t = 7 - 20^{\circ}\text{C}$ $\varphi = 0,6 \pm 0,1$ | 9 | 13,5 | $11,25 \pm 2,25$ |

На рисунке 1 представлены расчетные распределения влажности деревянных деталей для различных условий эксплуатации, анализируя которые можно сделать следующие выводы:

- максимально соответствует условиям эксплуатации (для отапливаемых помещений) детали изделий со средней влажностью $W_{\text{ср}} = 6,5\%$;
- рекомендуемая РТМ $W_{\text{ср}} = 10\%$ максимально подходит для изделий, эксплуатирующихся в условиях повышенных колебаний температуры и относительной влажности воздуха.

В таблице 2 приведены расчетные допустимые колебания влажности древесины.

Таблица 2 – Допускаемые колебания влажности древесины в деталях изделий

| № п/п | Вид изделий | Порода древесины | Диапазон допускаемых значений влажности, % |
|-------|---|------------------|--|
| 1. | Мебель | Сосна | 5,44 – 7,56 |
| | | Лиственница | 5,58 – 7,42 |
| | | Береза | 5,38 – 7,62 |
| | | Дуб | 5,31 – 7,69 |
| | | Бук | 5,75 – 7,25 |
| 2. | Столярно-строительные изделия (эксплуатируемые внутри отапливаемых помещений) | Сосна | 4,45 – 8,55 |
| | | Лиственница | 4,7 – 8,3 |
| | | Береза | 4,35 – 8,65 |
| | | Дуб | 4,25 – 8,75 |
| 3. | Столярно-строительные изделия (эксплуатируемые в условиях повышенных колебаний температуры и относительной влажности воздуха) | Сосна | 8,55 – 11,45 |
| | | Лиственница | 8,8 – 11,2 |
| | | Береза | 8,45 – 11,55 |
| | | Дуб | 8,35 – 11,65 |
| Бук | 9,07 – 10,93 | | |

Влажность древесины в изделиях (таблица 3) была определена для величины вероятного допускаемого значения брака $p = 5\%$.

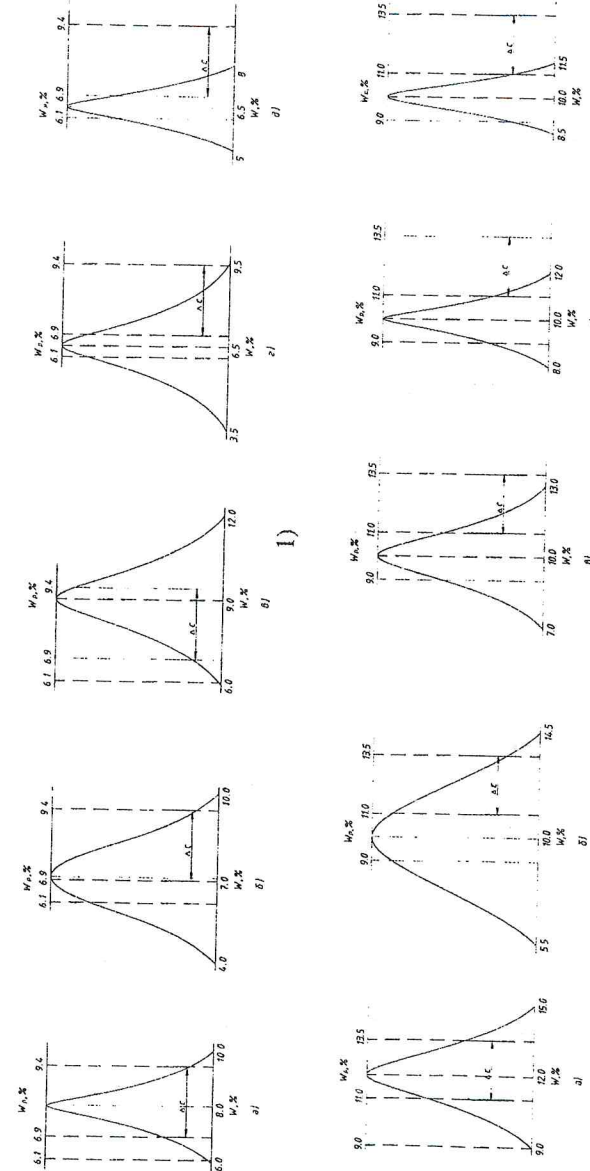


Рисунок 1 – Распределение влажности деталей мебели и столярно-строительных изделий и колебания равновесной влажности:
 1 – в отапливаемых помещениях (а – $W = 8 \pm 2\%$; б – $W = 7 \pm 3\%$; в – $W = 9 \pm 3\%$; г – $W = 6,5 \pm 3\%$; д – $W = 6,5 \pm 1,5\%$);
 2 – в условиях повышенных колебаний температуры и относительной влажности (а – $W = 12 \pm 3\%$; б – $W = 10 \pm 4,5\%$; в – $W = 10 \pm 3\%$; г – $W = 10 \pm 2\%$; д – $W = 10 \pm 1,5\%$).

Таблица 3 – Влажность древесины в изделиях

| № п/п | Вид продукции | Влажность, % | | Категория качества сушки |
|-------|---|-----------------|-----------|--------------------------|
| | | W _{ср} | S | |
| 1. | Мебель | 6,5 | 0,4 – 0,5 | I |
| 2. | Столярно-строительные изделия (эксплуатируемые внутри отапливаемых помещений) | 6,5 | 0,7 | II |
| 3. | Столярно-строительные изделия (эксплуатируемые в условиях повышенных колебаний температуры и относительной влажности воздуха) | 10,0 | 0,7 | II |

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Категории качества сушки, предусмотренные РТМ, не соответствуют требованиям стандартов на допускаемые колебания влажности в изделиях.

2. Рекомендуемые стандартами диапазоны влажности древесины в изделиях не соответствуют условиям эксплуатации. Рекомендуемые РТМ средние значения влажности в значительно большей степени соответствуют предполагаемым условиям эксплуатации. Однако рекомендуемые в конкретных категориях качества величины среднеквадратичных отклонений влажности являются завышенными: вероятное количество брака в партиях деталей мебели и столярно-строительных изделий может достигать 60 – 80%.

3. Требования к допускаемым отклонениям влажности древесины в партиях высушенных пиломатериалов должны быть существенно ужесточены, а именно для I и II категории качества как минимум в 2 раза, что полностью соответствует данным ранее проведенных исследований.

В третьем разделе «Общие методические положения» даны:

- методика проведения вычислительного эксперимента;
- методика экспериментальных исследований;
- описание проведения процесса и контроля показателей качества сушки;
- методика математической обработки результатов эксперимента.

Методика экспериментальных исследований разработана для сушки пиломатериалов в полупромышленной камере с принудительной циркуляцией агента сушки, установленной в лаборатории сушки ОАО «УралНИИПДрев» (таблица 4).

Для проведения сушки в камере формируется штабель шириной и высотой 2,0 м, длиной 6 м. Ряды пиломатериалов отделены друг от друга калиброванными прокладками толщиной 25 мм.

Система управления камерой позволяет реализовать любую структуру режима в пределах ее технических возможностей.

При проведении экспериментов были использованы две структуры режима:

- нормативная (согласно РТМ);
- структура БОС-режима.

После определения режимных параметров их значения вводятся в систему управления камерой и далее сушка проводится в автоматическом режиме.

Таблица 4 – 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 |

В четвертом разделе «Разработка технологии сушки пиломатериалов бесступенчатыми режимами оптимизированной структуры (БОС-режимами)» проведено компьютерное моделирование процессов сушки пиломатериалов режимами различной структуры в результате которого получено, что режимы сушки пиломатериалов, предлагаемые РТМ различных лет издания, не могут обеспечить качество сушки выше III категории качества по разбросу конечной влажности досок в штабеле, характеризуемым средним квадратическим отклонением влажности.

Анализ результатов моделирования конечной влаготеплообработки для пиломатериалов, высушиваемых нормальным трёхступенчатым режимом, рекомендованным РТМ, показал, что влаготеплообработка действительно снижает напряжения в поверхностных слоях древесины, однако перепад влажности по толщине доски при этом остается весьма существенным. Кроме того, влаготеплообработка существенно повышает среднюю влажность пиломатериала за счет увлажнения поверхностных слоев древесины, в результате чего, для получения заданного значения средней конечной влажности необходимо вначале пересушивать материал, что очевидно, экономически нецелесообразно. Дальнейшее применение кондиционирующей

обработки лишь несколько понизит влажность древесины на поверхности пиломатериала, радикально не изменив соотношения влажностей по толщине доски.

Задача повышения показателей эффективности и качества сушки пиломатериалов может рассматриваться как оптимизационная. Однако для проведения процедуры классической оптимизации необходимо наличие оптимизационной модели, включающей целевую функцию и систему ограничений, которая строится на основе математического описания объекта оптимизации. В данной работе построение математического описания объекта оптимизации, в качестве которого рассматривался режим сушки пиломатериалов, проводилось на базе специально спланированного вычислительного эксперимента.

Вычислительный эксперимент реализуется по схеме с пятью входными и пятью выходными параметрами (рисунок 2).

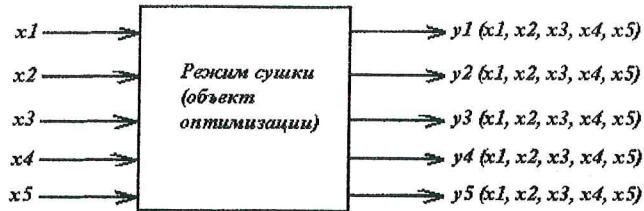


Рисунок 2 – Схема математического описания объекта оптимизации при реализации вычислительного эксперимента

Переменные факторы при проведении вычислительного эксперимента:

- x_1 – начальное значение равновесной влажности (u_{pn});
- x_2 – конечное значение равновесной влажности (u_{pk});
- x_3 – переходная влажность конечная (u_{nl});
- x_4 – начальное значение температуры агента сушки, $^{\circ}C$, (t_n);
- x_5 – конечное значение температуры агента сушки, $^{\circ}C$, (t_k).

Выходными параметрами вычислительного эксперимента являлись:

- τ_1 (y_1) – продолжительность сушки пиломатериалов до влажности $W = 12 \%$;
- τ_2 (y_2) – продолжительность сушки пиломатериалов до влажности $W = 7 \%$;
- S_T (y_3) – перепад влажности по толщине доски;
- S_W (y_4) – среднее квадратическое отклонение влажности;
- B_{min} (y_5) – минимальное значение критерия безопасности режима в процессе сушки.

Вычислительный эксперимент был реализован согласно плану Хартли, в результате реализации которого были получены следующие зависимости (для условного материала):

– Продолжительность сушки до влажности $W = 12 \%$ (τ_1):

$$\tau_1 = 21,8 \cdot 10^3 + 5,6 \cdot 10^4 u_{pn}^2 + 9 \cdot 10^5 u_{pk}^2 + 2 \cdot 10^3 u_{nl}^2 + 0,45 t_n^2 + 1,15 t_k^2 - 1,8 \cdot 10^4 u_{pn} u_{pk} - 2,2 \cdot 10^5 u_{pn} u_{nl} - 0,65 \cdot 10^2 u_{pn} t_n - 0,17 \cdot 10^3 u_{pn} t_k - 1,3 \cdot 10^5 u_{pk} u_{nl} + 0,65 \cdot 10^3 u_{pk} t_n - 0,66 \cdot 10^3 u_{pk} t_k + 0,16 \cdot 10^3 u_{nl} t_n - 0,78 \cdot 10^2 u_{nl} t_k + 1,05 t_n t_k + 0,7 \cdot 10^5 u_{pn} + 0,3 \cdot 10^5 u_{pk} + 1,4 \cdot 10^4 u_{nl} - 0,24 \cdot 10^3 t_n - 0,25 \cdot 10^3 t_k. \quad (6)$$

– Продолжительность сушки до влажности $W = 7 \%$ (τ_2):

$$\tau_2 = 2,9 \cdot 10^4 + 0,11 \cdot 10^6 u_{pn}^2 + 1,7 \cdot 10^6 u_{pk}^2 + 0,2 \cdot 10^6 u_{nl}^2 + 0,95 t_n^2 + 2,7 t_k^2 + 0,66 \cdot 10^6 u_{pn} u_{pk} - 0,43 \cdot 10^6 u_{pn} u_{nl} - 23,4 u_{pn} t_n - 0,12 \cdot 10^3 u_{pn} t_k - 0,57 \cdot 10^6 u_{pk} u_{nl} + 0,22 \cdot 10^3 u_{pk} t_n - 0,78 \cdot 10^3 u_{pk} t_k - 18,75 u_{nl} t_n + 0,18 \cdot 10^3 u_{nl} t_k - 1,66 t_n t_k + 6,7 \cdot 10^4 u_{pn} + 0,8 \cdot 10^5 u_{pk} - 3,1 \cdot 10^4 u_{nl} - 27,8 t_n - 0,4 \cdot 10^3 t_k. \quad (7)$$

– Перепад влажности по толщине доски (S_T):

$$S_T = 0,18 + 0,07 u_{pn}^2 + 1,06 u_{pk}^2 - 1,36 u_{nl}^2 + 1,06 \cdot 10^{-6} t_n^2 - 3,9 \cdot 10^{-6} t_k^2 + 7,8 u_{pn} u_{pk} + 0,6 u_{pn} u_{nl} + 6 \cdot 10^{-3} u_{pn} t_n - 5,6 \cdot 10^{-3} u_{pn} t_k - 11,8 u_{pk} u_{nl} + 0,03 u_{pk} t_n - 0,03 u_{pk} t_k - 4,8 \cdot 10^{-3} u_{nl} t_n + 5 \cdot 10^{-3} u_{nl} t_k - 3,1 \cdot 10^{-5} t_n t_k - 0,29 u_{pn} - 0,35 u_{pk} + 0,76 u_{nl} + 2 \cdot 10^{-3} t_n - 3 \cdot 10^{-3} t_k. \quad (8)$$

– Среднее квадратическое отклонение влажности (S_W):

$$S_W = -0,01 + 0,36 u_{pn}^2 + 5,76 u_{pk}^2 - 0,77 u_{nl}^2 + 5,8 \cdot 10^{-6} t_n^2 + 5,8 \cdot 10^{-6} t_k^2 + 0,94 u_{pn} u_{pk} + 0,31 u_{pn} u_{nl} + 9,4 \cdot 10^{-4} u_{pn} t_n - 9,4 \cdot 10^{-4} u_{pn} t_k - 0,75 u_{pk} u_{nl} + 3,75 \cdot 10^{-3} u_{pk} t_n - 3,75 \cdot 10^{-3} u_{pk} t_k - 7,5 \cdot 10^{-4} u_{nl} t_n + 7,5 \cdot 10^{-4} u_{nl} t_k - 3,1 \cdot 10^{-5} t_n t_k - 0,21 u_{pn} - 0,5 u_{pk} + 0,23 u_{nl} + 1,9 \cdot 10^{-3} t_n + 1,2 \cdot 10^{-3} t_k. \quad (9)$$

– Минимальное значение критерия безопасности режима в течение сушки (B_{min}):

$$B_{min} = 3,72 + 19,4 u_{pn}^2 + 310 u_{pk}^2 - 4,8 u_{nl}^2 + 3,7 \cdot 10^{-5} t_n^2 + 1,7 \cdot 10^{-4} t_k^2 + 14,7 u_{pn} u_{pk} - 9 u_{pn} u_{nl} + 0,08 u_{pn} t_n + 0,1 u_{pn} t_k + 18 u_{pk} u_{nl} - 0,01 u_{pk} t_n + 0,03 u_{pk} t_k - 5,75 \cdot 10^{-3} u_{nl} t_n - 0,01 u_{nl} t_k + 2,4 \cdot 10^{-4} t_n t_k - 11,39 u_{pn} - 22,27 u_{pk} + 2,78 u_{nl} - 0,03 t_n - 0,05 t_k. \quad (10)$$

Результаты оптимизации, проведённой в вычислительной среде Mathcad – 14 приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты оптимизации режима сушки по частным критериям

| № п/п | Управляющий фактор | Значения управляющих факторов для критериев оптимальности | | | | |
|----------------------------------|--------------------|---|----------------|-------|--------|-----------|
| | | τ_1 (час) | τ_2 (час) | S_T | S_W | B_{min} |
| 1 | u_{pn} | 0,1 | 0,1 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| 2 | u_{pk} | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,04 | 0,02 |
| 3 | u_{nl} | 0,2 | 0,174 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| 4 | t_n | 80 | 80 | 60 | 60,5 | 80 |
| 5 | t_k | 92 | 100 | 100 | 99,5 | 100 |
| Значения критериев оптимальности | | 90,8 | 120 | 0,011 | 0,0088 | 2,039 |
| Номер оптимального режима | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

Как следует из данных таблицы 4, оптимизация, проведённая по частным критериям, позволяет получить экстремальное значение критерия оптимальности, но остальные выходные параметры при этом, как правило, не

укладываются в рамки рекомендаций РТМ. Исключение составляют режимы № 4 и № 5.

На втором этапе была проведена оптимизация режимов сушки по требуемой категории качества. При этом предлагается новый подход к реализации режимов сушки пиломатериалов, который в корне отличается от предлагаемого РТМ. Предлагаемая нами система БОС-режимов позволяет назначать режим сушки пиломатериалов по требуемой категории качества.

Задача оптимизации для соответствующей категории качества может быть сформулирована в таблице 6.

Таблица 6 – Задача оптимизации по требуемой категории качества

| I категория качества | II категория качества | III категория качества |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| $\tau_2 \rightarrow \min$ | $\tau_2 \rightarrow \min$ | $\tau_2 \rightarrow \min$ |
| $-1 \leq x \leq 1$ | $-1 \leq x \leq 1$ | $-1 \leq x \leq 1$ |
| $B_{\min} \geq 1,3$ | $B_{\min} \geq 1,2$ | $B_{\min} \geq 1,2$ |
| $S_w \leq 0,01$ | $S_w \leq 0,015$ | $S_w \leq 0,02$ |
| $S_T \leq 0,02$ | $S_T \leq 0,025$ | $S_T \leq 0,035$ |

Результаты оптимизации режимов сушки по требуемой категории качества, полученные с применением процедуры Given – Minimize в Mathcad-14, приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты оптимизации режимов сушки по категориям качества

| № п/п | Управляющий фактор / критерий качества | Значения управляющих факторов / критериев оптимальности при категории качества | | |
|-------|--|--|-------|-------|
| | | I | II | III |
| 1 | u_{pn} | 0,168 | 0,11 | 0,1 |
| 2 | u_{pk} | 0,036 | 0,033 | 0,038 |
| 3 | u_{nl} | 0,1 | 0,1 | 0,2 |
| 4 | $t_n, ^\circ C$ | 66,25 | 74,7 | 80 |
| 5 | $t_c, ^\circ C$ | 100 | 100 | 100 |
| 6 | τ_2 , час | 247 | 179 | 143 |
| 7 | B_{\min} | 1,703 | 1,299 | 1,263 |
| 8 | S_T | 0,019 | 0,025 | 0,035 |
| 9 | S_w | 0,01 | 0,015 | 0,02 |

Целью экспериментальных исследований являлось определение рациональных значений управляющих факторов при реализации БОС-режимов сушки.

В качестве основного эксперимента был реализован план типа В₃. Схема проведения эксперимента приведена на рисунке 3.

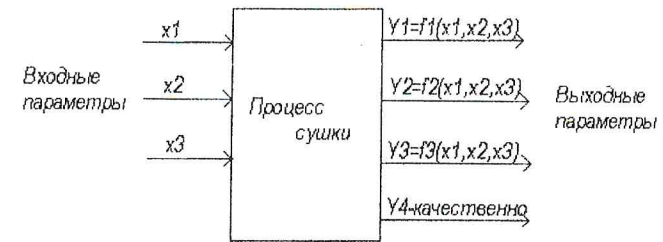


Рисунок 3 – Схема проведения эксперимента

Переменными факторами при проведении эксперимента являлись:
 u_{pn} (x_1) – начальное значение равновесной влажности агента сушки;
 u_{pk} (x_2) – конечное значение равновесной влажности агента сушки;
 t_n (x_3) – начальное значение температуры агента сушки, $^\circ C$.
 Выходными параметрами эксперимента являлись:
 $T_{сущ}$ (Y_1) – продолжительность сушки, час;
 S (Y_2) – среднеквадратическое отклонение влажности пиломатериалов, %;
 N (Y_3) – расход энергии на сушку, ГДж/м³;
 σ (Y_4) – внутренние напряжения в пиломатериалах после сушки (определялись качественно, по отклонению зубцов силовой секции).

В результате обработки результатов эксперимента получили функции отклика по выходным параметрам:

$$\hat{Y}_1 = 133,3 - 5,3x_1 - 7,5x_3 + 3,7x_1^2 + 19,7x_2^2 + 7,7x_3^2 + 3,38x_1x_2 - 2,38x_1x_3 - 6,38x_2x_3 \quad (11)$$

$$\hat{Y}_2 = 0,5 + 0,06x_1 + 0,01x_2 + 0,02x_3 + 0,25x_1^2 + 0,2x_2^2 + 0,35x_3^2 + 0,038x_1x_2 + 0,038x_1x_3 + 0,038x_2x_3 \quad (12)$$

$$\hat{Y}_3 = 1,15 + 0,043x_1 + 0,021x_2 + 0,012x_3 - 0,02x_1^2 + 0,05x_2^2 + 0,04x_3^2 - 0,008x_1x_2 - 0,003x_2x_3 \quad (13)$$

Оптимизация по частным критериям дала следующие результаты.

$$Y_1 = T_{сущ} = 105,5 \text{ час};$$

$$Y_2 = S = 0,749 \text{ %};$$

$$Y_3 = N = 2,769 \text{ ГДж/м}^3$$

При этом получили оптимальные значения управляющих факторов (таблица 8).

Таблица 8 – Оптимальные значения управляющих факторов

| для $T_{сущ}$ | для S | для N |
|---------------------|---------------------|---------------------|
| $u_{pn} = 0,12$ | $u_{pn} = 0,1$ | $u_{pn} = 0,14$ |
| $u_{pk} = 0,03$ | $u_{pk} = 0,04$ | $u_{pk} = 0,03$ |
| $t_n = 80 ^\circ C$ | $t_n = 70 ^\circ C$ | $t_n = 70 ^\circ C$ |

В результате решения компромиссной задачи методом условного центра масс получили рациональные значения параметров режима:

$$u_{pн}^{**} = 0,114$$

$$u_{pк}^{**} = 0,033$$

$$t_n^{**} = 73,4^{\circ}C$$

При этом значения выходных параметров процесса сушки составляют:

$$T_{суш} = 137,73 \text{ час};$$

$$S = 0,835 \%;$$

$$N = 2,769 \text{ ГДж/м}^3$$

Для проведения сравнительного анализа полученных результатов эксперимента был проведен ряд контрольных сушек пиломатериалов по нормативным режимам. Результаты данной серии опытов приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты опытных сушек нормативными режимами

| Режим сушек | Количество сушек | Выходные параметры процесса* | | | | | |
|-------------|------------------|------------------------------|----------------|---------------------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| | | Продолжительность сушки | | Среднеквадратическое отклонение | | Расход энергии на сушку | |
| | | T _{ср} , час | S _T | S _{ср} , % | S _s , % | N _{ср} , ГДж/м ³ | S _N , ГДж/м ³ |
| 4 – Н | 8 | 128 | 14,2 | 1,85 | 0,16 | 3,04 | 0,28 |

Примечания – 1. Температура на III ступени режима была 90 °С.

2. Внутренние напряжения во всех сушках соответствовали II категории качества сушки.

3. (*) – средние значения.

Полученные в результате оптимизации путём решения компромиссной задачи методом условного центра масс значения параметров режима весьма близко совпадают с полученными в главе 3 путём аналитической оптимизации параметрами режима для II категории качества (таблица 10).

Таблица 10 – Результаты аналитической и экспериментальной оптимизации режимов сушки условного пиломатериала

| № п/п | Параметры режима / значения выходного параметра | Значения | |
|-------|---|---------------------------|-------------------------------|
| | | Аналитическая оптимизация | Экспериментальная оптимизация |
| 1 | u _{pн} | 0,11 | 0,114 |
| 2 | u _{pк} | 0,033 | 0,033 |
| 3 | t _н , °С | 74,7 | 73,4 |
| 4 | t _к , °С | 100 | 95 |
| 5 | t _{сушкн} (W _к = 12 %), час | 125 | 1,38 |
| 6 | S _w , % (категория качества) | 1,5 (II) | 0,835 (I) |
| 7 | Внутренние напряжения, МПа (категория качества) | 1,376 (II) | I – II |

Достаточно близко также совпадает время сушки: в эксперименте оно на 9,4 % больше, что можно отнести в первую очередь на идеализацию условий сушки в вычислительном эксперименте.

Кроме того, следует отметить, что также достаточно близко совпадают результаты теории и эксперимента при сушке нормативными 3-ступенчатыми режимами, однако применение нормативных режимов, как в теории, так и на практике позволило получить качество сушки соответствующее только III категории качества.

Оценка экономической эффективности, показала, что при годовом объеме сушки 1800 м³ внедрение технологии на основе БОС-режимов обеспечивает экономию в размере 333 тыс. руб., в том числе за счет снижения брака около 150 тыс. руб. При этом общее снижение себестоимости сушки составляет около 20 %.

Выводы по главе:

1. Компьютерное моделирование процессов сушки пиломатериалов режимами различной структуры показало, что:

- нормализованные РТМ режимы без применения корректирующих качественные показатели процедур (промежуточные и конечные влаготеплообработки, кондиционирующая обработка) обеспечивают качество по таким показателям как среднее квадратическое отклонение влажности в штабеле и перепад влажности по толщине доски соответствующее лишь III категории качества;

- применение влаготеплообработок снижает внутренние напряжения, но не позволяет получить приемлемые значения перепада влажности древесины по толщине доски;

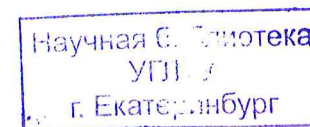
- специальные многоступенчатые режимы позволяют получать экстремально высокое качество сушки, но при слишком большой её продолжительности (приблизительно в 3 раза больше нормативной);

- применение БОС-режимов сушки обеспечивает необходимое качество сушки при её приемлемой продолжительности без применения влаготеплообработок, кондиционирующей обработки и т.п.

2. Выбранные в качестве управляющих факторов параметры режима сушки позволяют эффективно управлять выходными параметрами вычислительного эксперимента в достаточно широких пределах.

3. Оптимизация БОС-режимов по частным критериям показала, что определённый набор значений управляющих факторов позволяет получить значение параметра, характеризующего качество сушки на уровне или даже выше требований РТМ. Это в первую очередь касается таких параметров качества сушки, нормируемых РТМ как перепад влажности по толщине доски (S_T) и среднее квадратическое отклонение влажности в высушенном штабеле (S_w). В то же время, применение оптимизированного по одному показателю режима сушки не может обеспечить приемлемую величину остальных показателей, характеризующих качество сушки.

ФСР-А
А-1899



4. Оптимизация БОС-режимов, проведённая по категориям качества сушки показала высокий потенциал подобного подхода к назначению режимов, так как полученные при этом режимы позволяют получить пиломатериалы, отвечающие определённой категории качества без проведения влаготеплообработок и кондиционирующей обработки.

5. Оптимизация режимов сушки по параметрам энергоэффективности показала достаточно близкое совпадение параметров режима при оптимизации по расходу тепловой энергии и общей суммарной стоимости энергии. Однако минимальная стоимость энергии достигается при минимальном времени сушки, что объясняется существенной разницей в стоимости тепловой и электрической энергии.

6. Принципиальное отличие тепломассобмена при сушке БОС-режимами позволяет повысить равномерность сушки (снизить перепад влажности по толщине сортифта), а также существенно снизить внутренние напряжения.

7. Лабораторный эксперимент полностью подтвердил высокую достоверность ранее проведенного вычислительного эксперимента. Результаты экспериментальной оптимизации достаточно близко совпадают с аналитической.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Применяемая до настоящего времени в производстве система трёхступенчатых режимов, с современных позиций обладает целым рядом недостатков, обусловленных, главным образом, существенным перепадом величин параметров при переходе со ступени на ступень, что приводит к снижению качества сушки.
2. Современные технические средства позволяют реализовать так называемые БОС-режимы с плавным изменением величины параметров во времени, что в значительной степени нивелирует недостатки трёхступенчатых режимов, а также позволяет осуществлять непрерывное управление влагообменом древесины с обрабатываемой средой.
3. Нормативные режимы сушки (без применения влаготеплообработок и кондиционирующей обработки) могут обеспечивать качество сушки не выше III категории качества. Применение влаготеплообработки снижает внутренние напряжения в древесине, но не позволяет получить приемлемые величины перепада влажности древесины по толщине доски. Это связано с тем, что ступенчатое изменение величины основных параметров режима приводит к нарушениям в соотношении между внутренним и внешним влагообменом древесины.
4. Специальные многоступенчатые режимы позволяют получать экстремально высокое качество сушки, но при продолжительности приблизительно в 3 раза больше нормативной.
5. Полученные путём компьютерного моделирования процесса сушки БОС-режимы позволяют проводить сушку пиломатериалов, полностью

отвечающих определенной категории качества без применения влаготеплообработок и кондиционирующей обработки.

6. Экспериментальная оптимизация БОС-режимов сушки пиломатериалов показала достаточно близкое совпадение её результатов с результатами компьютерного моделирования.
7. Разработанная методика формирования БОС-режимов сушки пиломатериалов позволяет определять структуру и величины параметров режима в зависимости от требуемого качества сушки.
8. Внедрение разработанной технологии сушки в производство позволяет повысить качество сушки, а также снизить себестоимость сушки более, чем на 20 % за счёт снижения затрат тепловой и электрической энергии. Годовой экономический эффект составляет около 333 тыс. рублей при объёме сушки 1800 м³/год.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

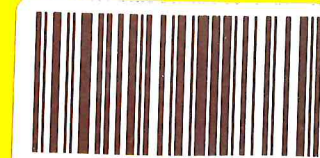
1. Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Старова Е.В., Миков А.А., Булатов С.В. Совершенствование системы требований к качеству сушки пиломатериалов // Системы. Методы. Технологии. Братск, 2017. С. 133 – 138.
2. Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Старова Е.В., Миков А.А., Булатов С.В. Теоретическое исследование сушильно-весового метода контроля влажности древесины // Системы. Методы. Технологии. Братск, 2017. С. 107 – 112.
3. Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Старова Е.В., Миков А.А. Анализ процессов сушки древесины существенно неизотермическими режимами // Лесн. журн. 2018. № 2. С. 114-125. (Изв. высш. учеб. заведений).

Патенты:

4. Пат. 2638229 РФ, Способ сушки пиломатериалов / Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Сливина Е.В. (Россия). № 2015140179; Заявлено 21.09.2015; Оubl. 12.12.2017. Бюл. № 35.

В сборниках докладов на конференциях:

5. Сливина Е.В., Шишкина Е.Е. Анализ потенциала агента сушки древесины // Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России». – Екатеринбург: УГЛТУ, 2013. С. 96 – 98.
6. Шишкина Е.Е., Старова Е.В., Миков А.А. О влиянии категории режима на затраты тепловой энергии на сушку пиломатериалов // Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов и конкурса по программе «Умник». Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. С. 13 – 14.



800054198

7. Шишкина Е.Е., Старова Е.В., Миков А.А. Пути снижения энергозатрат на сушку пиломатериалов // Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов и конкурса по программе «Умник». Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. – С. 23 – 25.
8. Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Сливина Е.В. Определение коэффициента влагообмена древесины с учетом эффекта Томпсона // Материалы X международной научно-технической конференции «Лесотехнические университеты в реализации концепции возрождения инженерного образования: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса». Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. – С. 141 – 143.
9. Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Сливина Е.В. Особенности тепломассообмена при сушке пиломатериалов бесступенчатыми режимами // Материалы X международной научно-технической конференции «Лесотехнические университеты в реализации концепции возрождения инженерного образования: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса». Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. – С. 144 – 146.
10. Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Старова Е.В., Миков А.А. Анализ способов удаления влаги из древесины // 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.
11. Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Старова Е.В., Миков А.А. Анализ структуры энергозатрат на камерную сушку пиломатериалов // 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.
12. Шишкина Е.Е., Старова Е.В., Миков А.А. Исследование метода оперативного контроля интегральной влажности древесины в штабеле пиломатериалов при сушке // Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России». – Екатеринбург: УГЛТУ, 2017. С. 89 – 91.
13. Шишкина Е.Е., Старова Е.В., Миков А.А. Нормативные методы контроля показателей качества сушки пиломатериалов // 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@vandex.ru

Подписано в печать _____, 2018. Объем 1 авт.л. Заказ № 316 Тираж 100 экз.
620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Отдел оперативной полиграфии.