

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЛАГОУДАЛЕНИЯ ИЗ ОПАДА ЛИСТВЕННЫХ ПОРОД ДЕРЕВЬЕВ

УДК 536.423:630.164.5:674.047

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ83	Полянская Алина Вячеславовна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Бульба Елена Евгеньевна	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент Отделения социально-гуманитарных наук ШБИП	Маланина Вероника Анатольевна	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель Отделения общетехнических дисциплин ШБИП	Романова Светлана Владимировна	—		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Максимов Вячеслав Иванович	к.т.н., доцент		

Томск – 2020 г.

Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные компетенции</i>		
Р1	Применять <i>глубокие</i> естественно-научные, математические и инженерные <i>знания</i> для формулирования заданий на разработку проектных решений, проектировать инновационные теплоэнергетические и теплотехнические системы и оборудование, разрабатывать проектные решения, связанные с модернизацией технологического оборудования	Требования ФГОС (ОК-1, 2, ОПК-1, 2, ПК-1, 3), Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р2	Применять <i>глубокие знания</i> в области современных технологий промышленной теплотехники для решения междисциплинарных инженерных задач разработки и проведения мероприятий по совершенствованию технологии производства, обеспечению экономичности, надежности и безопасности эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования	Требования ФГОС (ОК-1, 2, ОПК-1, 2, ПК-1, 3, 8), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р3	Ставить и решать <i>инновационные задачи инженерного анализа</i> , в области технологий промышленной теплотехники, с использованием современных методов и средств математического моделирования и практической инженерной деятельности	Требования ФГОС (ОК-1, 2, ОПК-2, ПК-1, 2, 3), Критерий 5 АИОР (пп. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р4	Разрабатывать инновационные технологические процессы, <i>проектировать</i> и использовать <i>новое</i> оборудование выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки, применять инновационные методы исследования, проводить исследования, критически интерпретировать, публично представлять и обсуждать результаты научных исследований	Требования ФГОС (ОК-1, 2, ОПК-1, 2, ПК-1, 3, 7), Критерий 5 АИОР (пп. 2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р5	Проводить теоретические и экспериментальные <i>исследования</i> в области современных технологий промышленной теплотехники в <i>сложных, неопределенных</i> условиях и представлять полученные результаты	Требования ФГОС (ОК-1, 2, ОПК-1, 2, ПК-1, 2, 3, 7), Критерий 5 АИОР (пп. 2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р6	Применять знания нетехнических ограничений инженерной деятельности при внедрении,	Требования ФГОС ОК-1, 2, ОПК-1, ПК-3, 4, 5, 6, 9, 10),

	<i>эксплуатации</i> и обслуживании современных высокотехнологичных аппаратов и систем, обеспечивая их <i>высокую эффективность</i> , соблюдение правил охраны здоровья и безопасности труда на производстве, выполнять требования по защите окружающей среды	Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P7	Осуществлять педагогическую деятельность в области профессиональной подготовки	Требования ФГОС ОК-1, ПК-11), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.2, 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
<i>Универсальные компетенции</i>		
P8	<i>Активно</i> владеть <i>иностранным</i> языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной профессиональной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной научно-исследовательской и инженерной деятельности	Требования ФГОС ОПК-2, 3, ПК-7), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	Эффективно работать индивидуально, в качестве <i>члена и руководителя группы</i> , состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, действовать в нестандартных ситуациях, принимать организационно-управленческие решения и нести за них ответственность при организации работ, разрабатывать мероприятия по предотвращению экологических нарушений	Требования ФГОС ОК-1, 2, ОПК-1, ПК-3, 4, 5, 7, 8, 9, 10), Критерий 5 АИОР (пп. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P10	Демонстрировать <i>глубокие знания философских аспектов</i> инновационной инженерной деятельности, компетентность в вопросах <i>устойчивого развития</i> , мыслить абстрактно, обобщать, анализировать, систематизировать и прогнозировать, принимать решения в сложных инженерных задачах с технической неопределенностью и недостатком информации	Требования ФГОС ОК-1, 2, ОПК-1, ПК-3, 4, 5, 7, 8, 9, 10), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	<i>Самостоятельно</i> учиться и, используя творческий потенциал, саморазвиваться, самореализовываться непрерывно <i>повышать квалификацию</i> в течение всего периода профессиональной деятельности	Требования ФГОС ОК-1, 3, ОПК-1, ПК-4, 8), Критерий 5 АИОР (1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа энергетики
Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника
Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
В.И. Максимов

(Подпись)

(Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ83	Полянской Алине Вячеславовне

Тема работы:

Экспериментальное исследование процесса влагоудаления из опада лиственных пород деревьев	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 43-61/с от 12.02.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:

8 июня 2020 года

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы; вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

Объект исследования: шесть образцов опада лиственных пород деревьев:

1. Ветки березы;
2. Ветки липы;
3. Ветки тополя;
4. Листья березы;
5. Листья липы;
6. Листья тополя.

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – Аналитический обзор научных источников в области исследования процесса влагоудаления из древесной и лиственной биомассы; – Описание установки и образцов для проведения эксперимента; – Определение массы испарившейся влаги; – Расчет массовой скорости испарения; – Приведение массовой скорости испарения к безразмерному виду; – Определение парциального давления и коэффициента аккомодации; – Обсуждение результатов и заключение по работе. <p>Дополнительно должны быть разработаны следующие разделы: финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; социальная ответственность; раздел на иностранном языке.</p>
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Слайды презентации</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Маланина Вероника Анатольевна, доцент Отделения социально-гуманитарных наук</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Романова Светлана Владимировна, старший преподаватель Отделения общетехнических дисциплин</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>Аналитический обзор литературы (Analytical review of world experience in researches of moisture removal processes from energy wood)</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>23 декабря 2019 года</p>
--	-----------------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ</p>	<p>Бульба Е. Е.</p>	<p>к.т.н., доцент</p>		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>5БМ83</p>	<p>Полянская А.В.</p>		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ83	Полянская Алина Вячеславовна

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение (НОЦ)	НОЦ И.Н. Бутакова
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Теплоэнергетика и теплотехника/ Технологии промышленной теплотехники

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	- Месячный оклад ИР – 38000 руб. - Месячный оклад инженера – 17000 руб. - Материальные затраты – 500 руб. - Амортизация - Стоимость 1 кВт·ч ЭЭ – 5,8 руб.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	- Районный коэффициент – 1,3
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	- Отчисления по страховым взносам – 30,2% от ФОТ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала и инновационного потенциала НИИ</i>	- Определение практической значимости проекта
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	- Определение целей проекта и критериев их достижения
3. <i>Планирование процесса управления НИИ</i>	- Планирование работ по выполнению НИ - Структура и график проведения - Бюджет НИ

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>«Портрет» потребителя результатов НИИ</i>
2. <i>График проведения и бюджет НИИ</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	23.03.2020
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Маланина В.А.	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ83	Полянская А.В.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ83	Полянская Алина Вячеславовна

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение (НОЦ)	НОЦ И.Н. Бутакова
Уровень образования	Магистратура	Направление/ специальность	Теплоэнергетика и теплотехника/ Технологии промышленной теплотехники

Тема ВКР:

Экспериментальное исследование процесса влагоудаления из опада лиственных пород деревьев

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования – процесс влагоудаления из опада лиственных пород деревьев (листьев и веток). Область применения – теоретическая теплоэнергетика, альтернативная энергетика. Рабочая зона – персональное место в лаборатории для проведения экспериментов, оснащенное специальным оборудованием и мебелью.
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: - специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; - организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	- Конституция РФ; - Трудовой Кодекс РФ от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018); - Федеральный закон от 24.07.1998 № 125-ФЗ (ред. от 27.12.2019) «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний»; - ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования; - СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	- отклонение показателей микроклимата; - превышение уровня шума; - отсутствие или недостаток естественного света; - недостаток освещенности рабочей зоны; - повышенное значение напряжения в электрической цепи; - повышенный уровень электромагнитных излучений; - повышенная температура поверхностей и образцов; - нервно-психические перегрузки
3. Экологическая безопасность:	обращение с отходами производства и потребления
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	наиболее типичная ЧС – пожар

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	20.03.2020
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преп. ООД	Романова С.В.	–		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ83	Полянская А.В.		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 202 с., 29 рис., 136 табл., 71 источник, 5 прил.

Ключевые слова: биомасса, конвективная сушка, массовая скорость испарения, коэффициент аккомодации, относительная влажность, парциальное давление.

Объектом исследования являются шесть образцов опада лиственных пород деревьев (ветки и листья березы, липы и тополя).

Цель работы – экспериментальное исследование основных характеристик процесса влагоудаления (массовой скорости испарения, парциального давления паров, коэффициента аккомодации) из опада лиственных пород деревьев с целью дальнейшего усовершенствования прогностических моделей процесса сушки, а также оценка влияния структуры высушиваемого материала на коэффициент аккомодации.

В качестве метода определения массовой скорости испарения, влажности и других величин, характеризующих процесс влагоудаления, был использован сушильно-весовой метод.

В результате исследования были получены зависимости массовой скорости удаления влаги от времени сушки (кривые скорости влагоудаления) для лиственного и древесного опада лиственных пород деревьев в размерном и безразмерном виде. Рассчитано парциальное давление паров, а также получены численные значения коэффициента аккомодации. Проанализировано как капиллярно-пористая структура объектов настоящего исследования влияет на коэффициент аккомодации при конвективной сушке.

Область применения: теплоэнергетика, лесная промышленность (сушка древесины).

Обозначения, сокращения, нормативные ссылки

Обозначения и сокращения

В настоящей работе применены следующие обозначения и сокращения:

ЛГМ – лесной горючий материал;

$W_{\text{отн}}$ – относительная влажность древесины;

Δm – масса испарившейся воды;

$w_{\text{исп}}$ – массовая скорость испарения;

S – площадь испарения;

Δt – рассматриваемый период сушки;

w' – безразмерная скорость испарения

P^* – давление парциальное;

$P^{\text{н}}$ – давление насыщенного пара;

R – универсальная газовая постоянная;

A – коэффициент аккомодации;

M – молекулярная масса;

T – температура вещества;

V – объем сушильной камеры;

$m_{\text{с.в}}$ – масса сухого воздуха;

$m_{\text{H}_2\text{O}}$ – масса водяного пара;

$M_{\text{H}_2\text{O}}$ – молекулярная масса воды;

$M_{\text{с.в}}$ – молекулярная масса сухого воздуха;

$g_{\text{H}_2\text{O}}$ – массовые доли водяного пара;

$r_{\text{H}_2\text{O}}$ – объемные доли водяного пара;

ПК – персональный компьютер;

ТКО – твердые коммунальные отходы;

ПБ – пожарная безопасность;

ЭМП – электромагнитные поля;

ГВ – горючие вещества.

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

- ГОСТ 12.0.003-2015 Опасные и вредные производственные факторы.

Классификация;

- ГОСТ 12.1.003-14 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности;
- ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к

воздуху рабочей зоны;

- ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов;

- ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя.

Общие эргономические требования;

- ГОСТ Р 51337-99 Безопасность машин. Температуры касаемых поверхностей. Эргономические данные для установления предельных величин горячих поверхностей;

• СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий;

• СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы;

• СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений;

• СН 2.2.4/2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки;

- СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение.

Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*;

• ТОИ Р-45-084-01 Типовая инструкция по охране труда при работе на персональном компьютере.

Оглавление

Введение	13
1 Аналитический обзор литературы	16
1.1 Характеристика и строение лиственной древесины	16
1.1.1 Древесные растения	16
1.1.2 Особенности микростроения лиственной древесины	17
1.1.3 Физические свойства древесины	18
1.1.4 Особенности лесного фонда России	25
1.1.5 Энергетическая древесина	25
1.1.6 Лесной горючий материал	28
1.2 Сушка древесины	29
1.2.1 Сведения об испарении	29
1.2.2 Виды сушильных камер	33
1.3 Математическое моделирование процессов тепломассопереноса при сушке древесины	38
1.4 Особенности сушки лесных горючих материалов	43
1.5 Выводы по разделу	47
2 Экспериментальное исследование процесса влагоудаления	49
2.1 Описание экспериментальной установки	49
2.2 Образцы для проведения эксперимента	50
2.3 Методика проведения эксперимента	51
3 Обработка результатов измерений	53
3.1 Расчет массовой скорости испарения	53
3.2 Расчет погрешностей измерений	55
3.3 Обезразмеривание массовой скорости испарения	60
3.4 Расчет коэффициента аккомодации	61
4 Анализ полученных результатов	67
4.1 Массовые скорости испарения влаги	67
4.2 Коэффициент аккомодации	79
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	81
5.1 Цели и результат проекта	82
5.2 Организационная структура и план проекта	83
5.3 Смета затрат на научное исследование	86
5.3.1 Расчет материальных затрат на научное исследование	86
5.3.2 Расчет амортизационных отчислений	86
5.3.3 Издержки на труд исполнителей	87
5.3.4 Прочие прямые затраты	89
	11

5.3.5 Накладные расходы	89
6 Социальная ответственность	91
Введение	91
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	92
6.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя)	
правовые нормы трудового законодательства	92
6.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	
исследователя	93
6.2 Производственная безопасность	95
6.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов	96
6.2.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия	
опасных и вредных факторов на исследователя (работающего)	103
6.3 Экологическая безопасность	108
6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	109
Выводы по разделу	111
Заключение	112
Список использованных источников	114
Приложение А	123
Приложение Б Результаты расчета площади испарения веток	141
Приложение В Результаты расчета массовой скорости испарения	159
Приложение Г Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости	
испарения	175
Приложение Д Результаты расчёта парциального давления и коэффициента	
аккомодации	189

Введение

На современном этапе развития общества при существующих техногенных нагрузках на окружающую среду чрезвычайно важным является взаимосвязанное развитие экономики, энергетики и экологии. Создание энергосберегающих процессов и оборудования, позволяющих обеспечить экономию топливных и энергетических ресурсов, является важнейшей задачей производства. На фоне острой проблемы – возрастания дефицита топливных ресурсов, причем не только традиционных, но и возобновляемых, наблюдается постоянный рост тарифов на энергоносители. Поэтому в последнее время возникла большая заинтересованность в вовлечении биомассы, являющейся наиболее доступным видом возобновляемого сырья, в топливно-энергетический баланс регионов и стран.

В настоящий момент одним из наиболее перспективных видов биомассы является лесная древесина (или лесные отходы) [1]. Обширные лесные угодья в Сибири могут ежегодно обеспечивать до $6 \cdot 10^6$ тонн лесной биомассы. Однако российский лесопромышленный комплекс по-прежнему остается ориентированным на сырье. Глубокой переработке подвергается около 20% древесины, в то время как в странах Скандинавии этот показатель составляет 85%. В этих странах реализована модель интенсивного использования лесных ресурсов, а в обществе давно культивируется философия безотходного и энергоэффективного производства [2].

Одной из важнейших проблем современной России является утилизация отходов древесины. Их использование в настоящее время минимально. А первичное древесное сырье, образующееся на лесосеках, по завершении работ собирается в валы и кучи и сжигается для предотвращения лесных пожаров [3].

Экономия невозобновляемых энергетических природных ресурсов – это путь, по которому идет цивилизованный мир, и который позволит России приблизиться к индустриально развитым странам по показателям удельной энергоемкости промышленного производства.

Лесная биомасса является относительно дешевым энергоносителем, ведь ее стоимость обусловлена только транспортными затратами [4]. Использование лесного горючего материала позволит значительно расширить сырьевую базу тепловых электростанций и существенно снизить зависимость от стран-импортеров энергоресурсов от монополистов в экспорте нефти, газа и угля. Большинство котельных агрегатов, работающих на данном топливе – это современные энергетические установки, имеющие высокий КПД (от 80 до 85%).

Наряду с экономической эффективностью использование растительной биомассы в энергетике способствует решению еще одной важной проблемы современности – защите окружающей среды: высокая реакционная способность позволяет сжигать ее при более низкой температуре, что уменьшает выбросы окислов азота; минимальное содержание серы и фосфора (0,1%) позволяет снизить температуру отходящих газов до 110-120 °С; и, наконец, энергетическое использование биотоплива является одним из радикальных путей решения проблемы снижения выбросов парниковых газов и сохранения баланса углекислого газа в природе, так как его выбросы при сжигании сопоставимы с количеством, произведенным при фотосинтезе.

Наиболее существенным недостатком лесного горючего материала как топлива является его нестабильное влагосодержание, которое в зависимости от вида колеблется в пределах от 8 до 80%, что приводит к снижению теплотворной способности и, как следствие, к увеличению расхода топлива [5]. Исходя из этого целесообразно организовать предварительную сушку при сжигании биомассы в топках котлов.

Во время сушки материалов в результате фазового перехода из жидкого или твердого состояния в газообразное происходит удаление влаги, что изначально определяет значительные энергетические затраты на проведение данного процесса [6].

Предварительная сушка биотоплива связана с дополнительными энергозатратами на удаление адсорбционной влаги из капиллярно-пористой структуры древесных материалов. Анализ закономерностей процессов

влагоудаления является одной из первоочередных задач, решение которой необходимо при использовании лесного горючего материала в качестве энергетического топлива.

Приоритетное использование в биоэнергетике пород лиственных деревьев предопределяет перспективу применения их отходов и опада в этой отрасли в качестве энергетического сырья. Эта гипотеза диктует необходимость дополнительного изучения процессов массообмена при термической подготовке такого рода биомассы.

Поэтому для работы сформулирована цель: экспериментальное исследование основных характеристик процесса влагоудаления (массовой скорости испарения, парциального давления паров, коэффициента аккомодации) из опада (листьев и веток) лиственных пород деревьев с целью дальнейшего усовершенствования прогностических моделей процесса сушки.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Аналитический обзор научных источников в области исследования процесса влагоудаления из древесной и лиственной биомассы;
2. Подготовка образцов для проведения экспериментов;
3. Изучение закономерностей процесса сушки рассматриваемых образцов опада (построение графиков зависимости массовой скорости испарения влаги от времени в различных температурных режимах, расчет коэффициента аккомодации и парциального давления паров);
4. Анализ полученных результатов и формулирование выводов.

1 Аналитический обзор литературы

1.1 Характеристика и строение лиственной древесины

1.1.1 Древесные растения

Древесными называются растения с деревянистыми надземными и подземными частями, по характеру развития подразделяются на деревья, кустарники и лианы. Взрослое дерево имеет ствол, крону и корни. Ствол связывает корневую систему с кроной дерева (совокупностью ветвей и листьев). По нему из почвы в восходящем токе перемещаются водные растворы минеральных веществ, а в нисходящем потоке – растворы органических веществ, вырабатываемых в листьях. По характеру облиствения деревья разделяют на две крупные физиономически четко разделяющиеся категории: хвойные деревья и лиственные деревья. Первые обладают своеобразной формой листьев – игольчатой или чешуйчатой хвоей, у вторых листья представляют собой пластины с разветвленным жилкованием [7].

На рисунке 1.1 представлены основные части ствола. Наружная часть – кора, выполняющая защитную функцию от внешних влияний – резко отличается от следующей за ней древесины, которая окружает очень небольшую центральную зону – сердцевину. Между корой и древесиной расположен тонкий слой живых клеток – камбий, в котором происходит образование новых клеток, вследствие чего ежегодно образуются новые годовичные кольца. В древесине лиственных пород на разрезе видны отверстия, представляющие собой сечения сосудов – трубок, каналов, предназначенных для проведения воды.

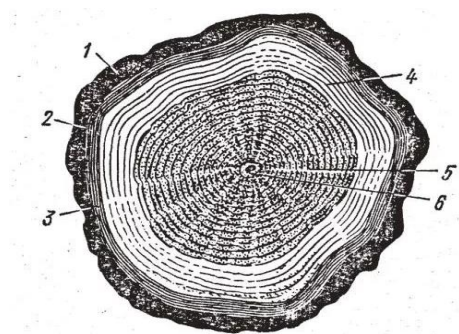


Рисунок 1.1 – Строение ствола дерева на поперечном разрезе:

1 – кора, 2 – луб, 3 – камбий, 4 – заболонь, 5 – ядро, 6 – сердцевина

Значительная доля биомассы приходится на крону и корни растущего дерева. Крона включает в свой состав ветви и сучья, представляющие собой живые или отмершие боковые побеги дерева и имеющие такое же строение, что и ствол.

1.1.2 Особенности микростроения лиственной древесины

С точки зрения микростроения древесина представляет собой комплекс тканей, выполняющих водопроводящую, механическую и запасную функцию в стволе дерева. Она состоит из элементов, имеющих различный уровень структурной специализации и функционального совершенства, что определяется эволюционной продвинутостью древесных растений [8]. Лиственные деревья более развиты в эволюционном отношении растения, чем представители хвойных пород. Поэтому древесина лиственных пород имеет более сложное строение, чем хвойных и для нее характерен большой набор высокоспециализированных элементов и их переходных форм [9].

Микроскопическое строение древесины лиственных пород представлено на рисунке 1.2.

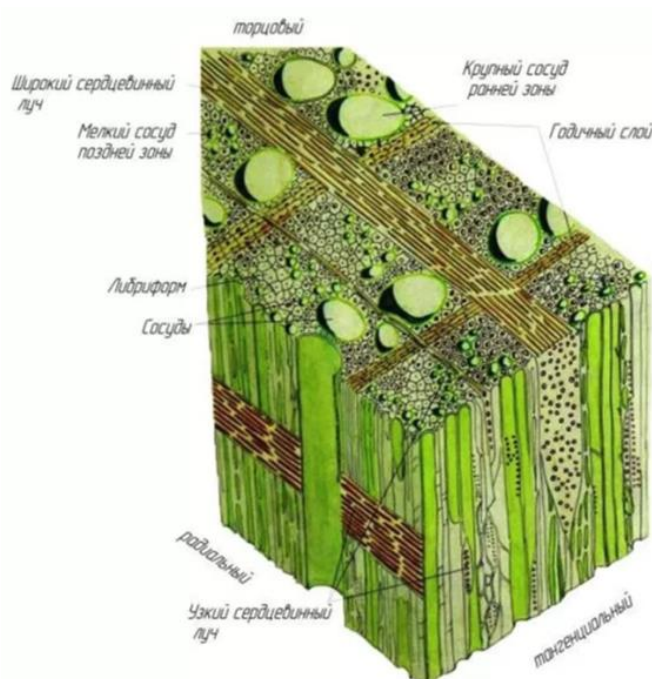


Рисунок 1.2 – Микроскопическое строение древесины лиственных пород

Основная масса древесины образована идущими вдоль оси ствола волокнами (либриформ) и сосудами. В отличие от трахеид хвойных, совмещающих проводящую и механическую функции, сосуды лиственных пород являются основными водопроводящими элементами, а либриформ – основной тканью ствола, воспринимающей механические нагрузки.

В таблице 1 в качестве примера представлен гистологический состав древесины березы. Здесь сосудистая трахеида представляет собой промежуточный элемент между типичной трахеидой и члеником сосуда, а волокнистая трахеида – переходный элемент от трахеиды к волокну либриформа.

Таблица 1 – Процентное соотношение элементов древесины березы [9]

Сосуды	Сосудистые трахеиды	Волокнистые трахеиды	Волокна либриформа	Паренхима	Сердцевидные лучи
24,5	7,4	24,2	37,8	1,6	6,5

1.1.3 Физические свойства древесины

Свойства древесины, которые обнаруживаются при испытаниях, и не приводят к изменению её химического состава, называются физическими. К ним относятся:

- внешний вид древесины (цвет, блеск, запах, текстура);
- влажность и свойства, связанные с её изменением (плотность, усушка, разбухание, влагоотдача, влагопоглощение, водопоглощение, проницаемость к жидкостям и газам);
- тепловые свойства (теплопроводность, температуропроводность и тепловое расширение);
- электрические свойства (электропроводность);
- звуковые свойства (звукопроводность).

Рассмотрим физические свойства древесины, изменяющиеся в процессе ее сушки.

Влажность древесины

Этот показатель используется для количественной характеристики содержания воды в древесине. Влага необходима растущему дереву для

нормальной жизнедеятельности. Однако, в срубленном дереве влага играет отрицательную роль, ухудшая технические свойства древесного материала.

Различают абсолютную и относительную влажность древесины [10]. Абсолютная влажность – отношение массы влаги, содержащейся в древесине, к массе абсолютно сухой древесины, выраженное в процентах

$$W_{abs} = \frac{(m - m_o)}{m_o},$$

где m – масса образца влажной древесины, г; m_o – масса образца абсолютно сухой древесины.

Относительная влажность – отношение массы воды к массе влажной древесины, выраженное в процентах

$$W_{rel} = \frac{(m - m_o)}{m}.$$

В таблице 2 приведена классификация древесины по степени влажности.

Таблица 2 – Степень влажностного состояния древесины [11]

Состояние древесины	Условия достижения	Влажность W, %
Мокрая древесина	Длительное нахождение в воде	> 100
Свежая (свежесрубленная) древесина	Сохранение влажности растущего дерева	50-100
Древесина после атмосферной сушки (воздушно-сухая)	Сушка или выдержка на открытом воздухе	15-20
Древесина после камерной сушки (комнатно-сухая)	Сушка в камерах или выдержка в отапливаемом помещении	8-12
Абсолютно-сухая древесина	Сушка при $t = 103 \pm 2^\circ\text{C}$	0

В структуру древесины влага проникает через поперечные разрезы и может быть в связанном или свободном состоянии (рис. 1.3). Связанная (гигроскопическая) влага находится внутри стенок клеток, непосредственно в древесинном веществе, удерживается физическими, физико-химическими и химическими связями. Удаление этого вида влаги из древесины весьма затруднительно, связано с большими затратами энергии и оказывает влияние на механические свойства древесины. Свободная (капиллярная) влага, находящаяся во внутриклеточном и межклеточном пространстве, а также в полостях и пустотах древесины, удерживается за счет простых механических связей,

удаляется легко при обычной сушке древесины и оказывает меньшее влияние на её свойства.

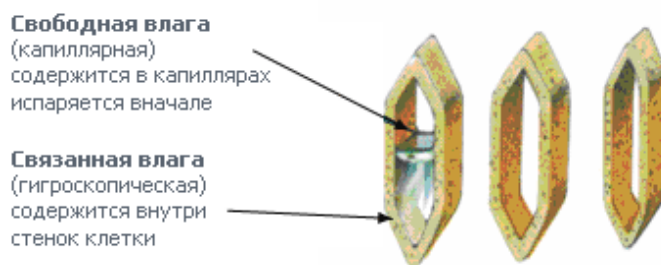


Рисунок 1.3 – Сосуды и капилляры древесины

Содержание связанной влаги в древесине ограничено. Состояние, при котором стенки клеток имеют максимальную при соприкосновении их с водой, называется пределом их насыщения $W_{п.н}$. Из-за наличия в полостях клеток и в межклеточных пространствах свободной воды экспериментальное определение $W_{п.н}$ затруднительно, поэтому эту величину в % можно определить по формуле

$$W_{п.н} = \left(\frac{1}{\rho_б} - \frac{1}{\rho_о} \right) \cdot \rho_в \cdot 100,$$

где $\rho_б$ и $\rho_о$ – базисная плотность древесины и плотность абсолютно сухой древесины соответственно, г/см³; $\rho_в$ – плотность связанной воды, г/см³.

Предел насыщения клеточных стенок практически не зависит от температуры и породы древесины. В среднем он равен 30%. Если общая влажность древесины выше предела насыщения это значит, что в ней кроме связанной влаги содержится также свободная. Максимальное содержание свободной воды зависит от объема полостей клеток и колеблется для древесины различных пород от 60 до 250%.

Древесина относится к гигроскопическим материалам, т.е. таким, которые обладают свойством изменять свою влажность с изменением состояния окружающей среды. При выдерживании древесины на воздухе влажность становится устойчивой. Древесина может достигать устойчивого влажностного состояния либо поглощая водяные пары из воздуха (сорбция), либо выделяя их в воздух (десорбция). Водяные пары из воздуха могут поглощать только клеточные стенки, появление свободной воды при этом невозможно. Величина,

характеризующая отсутствие воды в полостях клеток, и означающая равновесие влажности клеточных стенок с воздухом, носит название предел гигроскопичности клеточных стенок $W_{п.г}$. Это такое влажностное состояние древесины, при котором в результате сорбции паров воды из воздуха она поглотила максимально возможное количество связанной влаги, но не содержит свободной.

Величина устойчивой влажности древесины, длительно выдержанной в воздухе стабильного состояния с температурой t и относительной влажностью φ практически одинакова у всех пород и приблизительно составляет 30%, то есть равна пределу насыщения клеточных стенок. В отличие от предела насыщения клеточных стенок, предел гигроскопичности уменьшается с повышением температуры.

В процессе сушки влажность древесины постепенно уменьшается. При этом одновременно происходят два явления: испарение воды (лагоотдача) в окружающую среду и перемещение воды изнутри к поверхности. Основными факторами движения влаги в древесине являются:

- явление лагопроводности, так называемое перемещение влаги в направлении пониженной влажности, вызванное её неравномерным распределением по объему материала. Лагопроводность лежит в основе способности древесины проводить связанную воду при влажности древесины ниже предела гигроскопичности $W_{п.г}$;

- явление термлагапроводности: свойство древесины перемещать лагу под действием градиента температур в направлении пониженной температуры;

- явление молярного лагопереноса или лагопроводности: движение влаги в сторону более низкого давления в виде направленного потока пара и жидкости под действием внешней давления в древесине. Лагопроводность лежит в основе передвижения свободной воды при влажности выше $W_{п.н}$.

Влажность – один из важных показателей качества энергетической древесины. Она оказывает существенное влияние на теплотворную способность

и как следствие на общий объем произведенной тепловой энергии. Так при сжигании абсолютно сухой древесной биомассы с невысокой зольностью эффективность работы котлоагрегатов приближается по производительности и КПД к котлоагрегатам на жидком топливе, а в ряде случаев превосходит эффективность котлоагрегатов, работающих на некоторых видах каменных углей.

Поэтому для понимания процессов, происходящих при сушке древесины важно контролировать и получать достоверные сведения о ее влажности. Современное состояние техники для измерения влажности изложено в [12].

Для измерения влажности древесины применяют прямые и косвенные методы. Прямые методы основаны на удалении влаги из древесины. К прямым методам относится сушильно-весовой способ. По изменению массы высушенного образца вычисляют влажность образца до сушки. Косвенные методы основаны на измерении других физических величин, от которых зависит содержание влаги в древесине, например, электрические свойства. В качестве средств измерения применяют влагомеры различной конструкции (диэлектрические, кондуктометрические, индуктивные).

Однако свободная жидкость, присутствующая в древесине, не позволяет измерять влажность в широких пределах. В [13] рассмотрена возможность расширения предела измерения влажности древесины с помощью инфракрасного излучения на примере древесины березы. Так как поглощательная способность жидкости, больше, чем древесины, ИК излучение, проходящее через влажную древесину, ослабевает в зависимости от влажности. По изменению интенсивности ИК излучения можно определить содержание влаги в образце.

В исследовании [14] продемонстрирована возможность использования терагерцового излучения для оценки влагосодержания древесины в процессе ее высушивания. Установлено, что ТГц-излучение полностью поглощается пленкой воды толщиной 0,1 мм. Инфракрасная термографическая регистрация температурного поля позволяет регистрировать пространственное

распределение ТГц-излучение после его прохождения сквозь древесину и, следовательно, контролировать ее влагосодержание.

Плотность древесины

Плотность древесинного вещества $\rho_{д.в}$ – масса единицы объема материала, который образует клеточные стенки. Ввиду того, что химический состав клеточных стенок древесины одинаков для всех пород, величина этого показателя для всех пород составляет 1,53 г/см³. Поскольку древесина включает в себя пустоты (полости клеток и межклеточные пространства, заполненные воздухом), ее плотность меньше плотности древесинного вещества. Плотность древесины зависит от ее влажности. Различают понятия плотность абсолютно сухой древесины ρ_0 и плотность влажной древесины ρ_W . К повышению плотности древесины приводит увеличение содержания свободной воды. Повышение же содержания связанной воды (до $W=30\%$) незначительно влияет на плотность древесины.

Для сравнения величин вводят понятие нормализованная плотность ρ_{12} , это плотность древесины 12% влажности. Для расчетов процессов нагревания, сушки древесины, оценки ее качества различают базисную плотность древесины ρ_6 – отношение массы абсолютно сухого образца m_0 к его объёму V_{max} при влажности, равной или выше предела насыщения клеточных стенок.

Средние значения нормализованной плотности ρ_{12} , плотности абсолютно сухой древесины ρ_0 и базисной плотности ρ_6 для деревьев лиственных пород приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Среднее значение плотности древесины лиственных пород [11]

Порода дерева	Плотность, кг/м ³		Базисная плотность ρ_6 , кг/м ³
	ρ_{12}	ρ_0	
Береза	640	620	520
Липа	500	465	400
Тополь	455	425	375

Теплоемкость древесины

Удельная теплоёмкость c – это показатель способности материала аккумулировать тепло. Сухая древесина представляет собой двухфазную

систему, состоящую из древесинного вещества и воздуха. Доля воздуха в древесине незначительна, поэтому теплоемкость сухой древесины практически равна теплоемкости древесинного вещества и при 0 °С для всех пород равна 1,55 кДж/(кг·°С). С увеличением влажности древесины от 0 до 130 % теплоемкость повышается примерно в 2 раза.

Теплопроводность древесины

Теплопроводность – свойство, характеризующее интенсивность переноса тепла в материале. На это физическое свойство древесины оказывает влияние ее плотность. С увеличением плотности сухой древесины, т. е. с повышением доли, занимаемой в единице объема древесинным веществом, возрастает теплопроводность древесины. Это явление объясняется тем, что древесинное вещество имеет примерно в 20 раз больший коэффициент теплопроводности, чем воздух. При увлажнении древесины происходит замещение содержащегося в ней воздуха водой, имеющей в 23 раза большую теплопроводность, что приводит к возрастанию теплопроводности древесины. Повышение температуры влажной древесины способствует еще большему увеличению теплопроводности.

Температуропроводность древесины

Способность древесины выравнивать температуру по объёму характеризует температуропроводность a . У абсолютно сухой древесины коэффициента температуропроводности возрастает при уменьшении плотности, вызванной увеличением в единице объема древесины доли воздуха, имеющего температуропроводность примерно в 100 раз большую, чем древесинное вещество. При увеличении содержания свободной воды ($W > W_{п.н}$) происходит резкое падение температуропроводности, потому как воздух в полостях клеток замещается водой, имеющей примерно в 150 раз меньший коэффициент температуропроводности. Однако, в области ниже $W_{п.н}$ влияние влажности на величину a практически не наблюдается. Это связано с тем, что в клеточных стенках воздуха почти нет, следовательно клеточная стенка состоит из двух фаз – древесинного вещества и воды, имеющих примерно равные коэффициенты температуропроводности.

1.1.4 Особенности лесного фонда России

Большая часть лесов России находится в таежной зоне. Леса европейской части страны представлены хвойными (сосна обыкновенная и ель европейская) и лиственными (осина, береза повислая и пушистая, ольха). В сибирских лесах основными лесобразующими древесными породами являются пихта сибирская, кедр сибирский и лиственница [15].

Лиственные породы занимают около 20% площади лесов нашей страны и отличаются от хвойных пород разнообразием. Однако в районах Центра европейской части России после рубки вместо хвойных появляются лиственные деревья (береза, осина и др.), т.е. происходит процесс смены древесных пород.

По характеру расположения сосудов в годовом слое различают кольцесосудистые и рассеяннососудистые лиственные породы. На территории Западной Сибири в основном произрастают рассеяннососудистые породы – более многочисленные и разнообразные по свойствам и строению по сравнению с кольцесосудистыми породами. Так для Томской области характерными лиственными породами являются береза повислая, осина обыкновенная, тополь белый серебристый, ива, клен татарский.

1.1.5 Энергетическая древесина

Начало энергетического (топливного) использования древесины положено с того времени, когда человек научился полезно использовать огонь [16]. Если ранее древесина была основным, а зачастую единственным видом топлива, в последние годы она является альтернативным источником энергии. Вклад биомассы в мировой энергетический баланс равен порядка 1,8%, в баланс стран ЕС – 5%, с баланс России – 5%.

В настоящее время получение топлива из древесины может быть как самостоятельным производством, так и побочным. В этом случае энергетическую древесину разделяют на первичное, вторичное древесное сырье и древесину специальных энергетических посадок. К первичному сырью относят: порубочные остатки (кору, сучья, пни, верхушки деревьев, тонкомеры),

неделовую и дефектную древесину, отходы от деревообработки и лесопиления (опилки, стружку, древесную пыль, щепу, кусковые отходы), отходы технологических процессов, использующих древесину в качестве сырья; к вторичному – отходы, которые ранее использовались для различных целей (поддоны, шпалы, рудничные стойки) [17].

По форме и способу производства древесное топливо может быть необлагороженное (дрова, топливная щепка, стружка, опилки, отходы от раскряжевки и лесопиления) и облагороженное (топливные брикеты, пеллеты, таблетки, древесный уголь, газогенераторный газ, этиловый спирт и др.)

Экономически целесообразно использовать все дрова и отходы в качестве топлива производства тепловой энергии по стадиям их получения. Пример расчета получения планируемой к выпуску товарной продукции в процессе работы предприятия приведен в таблице 4.

Таблица 4 – Ориентировочные ресурсы древесного топлива для производства тепловой энергии [18]

Стадии получения древесного сырья, используемого для производства тепловой энергии	Ресурсы сырья для использования на топливо	
	в процентах к объему производства	объем на каждые 1000 м ³ перерабатываемого сырья по стадиям, м ³
Раскряжевка хлыстов: - внебалансовые кусковые отходы - дрова	2-3 10-40	20-30 100-400
Первичная переработка (раскрой сырья): - опилки - кусковые или мягкие отходы	8-12 14-30	80-120 140-300
Вторичная переработка (пр-во столярно-строительных изделий): - опилки, стружка, кусковые отходы	10-60	100-600

При использовании древесного сырья в качестве топлива необходимо учитывать его теплотехнические свойства. Основным показателем качества топлива является низшая теплота сгорания (теплотворная способность) Q_n^p , – количество тепла, выделившееся при сгорании единицы топлива, за вычетом тепла, израсходованного на испарение влаги, образовавшейся при сгорании этого топлива. Для древесины величина показателя низшей теплоты сгорания зависит от породы древесины и ее влажности. В таблице 5 приведены значения

теплотворной способности древесины лиственных пород при различной влажности.

Таблица 5 – Теплотворная способность древесины лиственных пород при различной влажности [19]

Порода древесины	Береза	Тополь
Теплотворная способность свежесрубленного дерева (влажность около 50%), Гкал/м ³	1,23	0,93
Теплотворная способность полусухих дров (влажность 30%), Гкал/м ³	1,476	1,116
Теплотворная способность древесины, пролежавшей под навесом не менее 1 года (влажность 2%), Гкал/м ³	1,722	1,302

Существует мнение, что указание значения только низшей теплоты сгорания древесного топлива при оценке ее энергетического потенциала приводит к завышению КПД топливосжигающих установок. Для устранения неоднозначности понятий и уточнения данных о составе различных видов древесного топлива и величинах его теплотехнических характеристик, были определены значения низшей и высшей теплоты сгорания отдельно для древесины лиственных пород и хвойных пород по данным их элементарного состава, отдельно для их коры [20].

В [21, 22] затронуты экономические аспекты использования древесного топлива для нужд энергетики. В [21] указывается, что в условиях постоянно растущих цен на энергоносители, использование древесного топлива в виде дров и отходов на предприятиях лесного комплекса при выработке тепловой энергии позволяет удовлетворить потребности в теплоте на собственные нужды: для сушки пиломатериалов, для отопления производственных объектов, а также производить тепловую энергию на продажу. Автономные котельные, работающие, на топливе, которое нет необходимости покупать, обеспечивают независимость таких предприятий от энергоснабжающих организаций.

В [22] подчеркнута важная роль биоэнерготехнологии для удаленных тепло- и электроснабжения маломощных потребителей (например, лесные поселки) которые могут снабжаться теплом и электроэнергией от автономных источников, работающих на древесном топливе.

1.1.6 Лесной горючий материал

Под лесным горючим материалом (ЛГМ) понимают растения лесов, их морфологические части и растительные остатки различной степени разложения, которые могут гореть при лесных пожарах [23]. Разделение ЛГМ на классы может осуществляться на различных уровнях, например, исходя из элементарных частей комплексов ЛГМ, когда рассматриваются отдельные растения напочвенного покрова, опад, морфологические части деревьев [24].

Рассмотрим наиболее популярные классификации ЛГМ. В соответствии с классификацией Национальной системы пожарной опасности США ЛГМ делятся на отмершие и живые, а также «тонкое горючее» – напочвенный покров из усохших травянистых растений. При разделении используются стандартные условия воздушной среды, а именно температура воздуха 26,5°C, относительная влажность 20%.

Живые горючие материалы делятся на 2 класса: травы и травянистые растения; хвоя, листва и ветки диаметром не более 6 мм. В рамках этих двух моделей образцы ЛГМ проходят несколько стадий, характеризующихся своим значением влажности и этапом развития.

Мертвые материалы делятся на 4 класса в зависимости от временного лага. Под временным лагом понимают период времени, за который происходит потеря двух третей того количества влаги, которое испарилось бы из образца при стандартных условиях [25].

Ещё одна распространенная система классификации ЛГМ, состоящая из четырех подсистем, была разработана в Канаде в рамках системы прогноза пожарной опасности. Тип ЛГМ является одним из входных параметров подсистемы прогноза поведения лесного пожара Fire Behavior Prediction (FBP). Выделено 5 топливных моделей, включающих в себя 18 видов топлива [26]. Основными топливными моделями в рамках данной классификации являются:

1. Хвойные топлива. В рамках данной модели выделяют 7 типов ЛГМ, среди которых наиболее воспламеняемыми считаются хвоинки ели и сосны.

2. Травяные топлива. Представляют собой лесную подстилку. В модель входят травяные топлива характерные для весны и для конца лета. Разделение подстилки по сезонам объясняется особенностями влажности и состава.

3. Смешанные топлива. Модель описывает различные комбинации хвойных и лиственных пород в зависимости от процентного соотношения хвойной и лиственной составляющей (здесь различают 4 типа ЛГМ).

4. Лиственные топлива – в данную модель входят 2 типа ЛГМ (безлистные и зеленые).

5. Рубленые топлива – эта группа объединяет 3 типа ЛГМ, которые являются остатками деятельности человека, например, остатки древесных пород после вырубки.

Также в канадской классификации ЛГМ можно выделить три большие группы: почвенные (гумус, торф, корни); напочвенные (опад листвы и хвои, травы, мелкие кустарники, крупный валежник); кроновое горючее (ветки с хвоей и листвой и отмершие сучья) [26].

В России наиболее распространенной является классификация Н.П. Курбатского [23]. ЛГМ разделены в соответствии с их ролью в процессе горения лесного биогеоценоза на: мхи и лишайники; подстилку (полуразложившийся опад, гумусовый торфянистый горизонт); травы и кустарнички (вместе с подростом, самосевом, подлеском); мертвые древесные остатки (сухостой, валежник, сучья, пни, порубочные остатки); подрост и подлесок (кустарник); хвою и листву растущих деревьев; стволы растущих деревьев и живые сучья (толщиной более 7 мм).

1.2 Сушка древесины

1.2.1 Сведения об испарении

Процесс сушки заключается в принудительном удалении влаги из материала с помощью испарения за счет подведенного к материалу тепла. При этом содержащаяся в нем влага переходит в парообразное состояние и удаляется в окружающую среду. При сушке в процессе испарения принимают участие не

только процессы, происходящие в парогазовой смеси и на поверхности, но и внутри твердого материала [27].

Сушка древесины происходит путем перемещения влаги от середины к поверхности по системе макрокапилляров, заполненных воздухом (полости клеток, межклеточные пространства), и по системе микрокапилляров в клеточных стенках и её испарения с поверхности. По макрокапиллярам влага перемещается в виде пара, а по микрокапиллярам – в основном, в виде жидкости.

Сушка древесины – сложный процесс, при котором одновременно происходит ряд физических явлений [28]:

- теплообмен (передача тепла материалу от агента сушки или источника тепловой энергии);
- теплопроводность (перемещение тепла внутри материала);
- влагоперенос (перемещение влаги внутри материала);
- влагоотдача (испарение влаги с поверхности материала в окружающую среду).

Основные факторы, определяющие массоперенос при сушке – градиент влажности, температуры и давления.

Влажные материалы в зависимости от их основных коллоидно-физических свойств по классификации А.В. Лыкова [29] подразделяют на три вида: типично коллоидные тела, капиллярно-пористые тела и капиллярно-пористые коллоидные тела. Древесину относят к капиллярно-пористым коллоидным материалам, обладающим свойствами первых двух видов. Стенки ее капилляров эластичны, а при удалении влаги сужаются. При сушке поверхностные слои дают большую усадку (уменьшение объемных размеров), вследствие чего капилляры становятся коническими, обращенными отверстиями меньшего радиуса наружу, что способствует перемещению влаги к поверхности тела.

По аналогии с теплообменом интенсивность влагообмена принято определять по отношению ко всей площади поверхности сохнущего материала. В реальности испарение воды при сушке происходит только с менисков

капилляров, выходящих на поверхность древесины, относительная суммарная площадь которых существенно меньше площади поверхности сохнущего материала.

Процесс сушки характеризуется изменением влажности, температуры материала и скоростью сушки. Скорость сушки – величина, изменяющаяся неравномерно во времени в течение всего процесса. Изменения параметров, происходящие при сушке, анализируют по кривым сушки (зависимость изменения средней влажности материала во времени), по кривым скорости сушки (зависимость изменения во времени отношений интервалов средней влажности и времени), по температурным кривым (рис. 1.4). На кривых сушки выделяют отдельные участки, соответствующие трем периодам сушки [30].

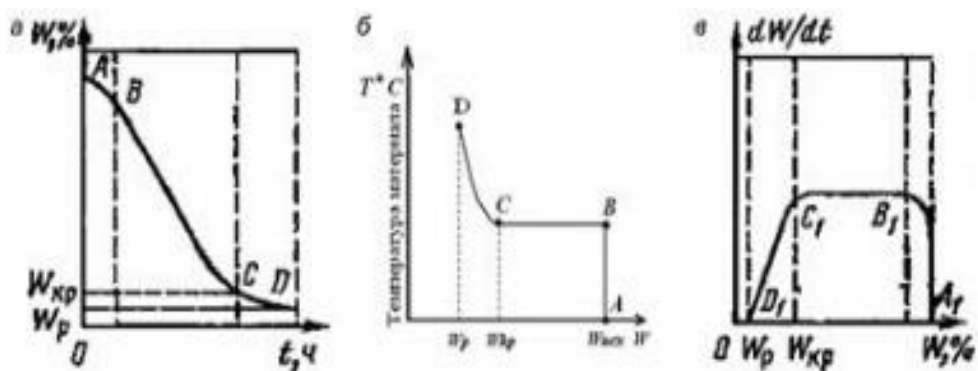


Рисунок 1.4 – Кривые сушки: а – зависимость влажности продукта от времени высушивания; б – зависимость температуры материала от времени сушки; в – зависимость скорости сушки от влажности

Первый период – период нагрева материала (участок АВ, рис. 1.4а). Тепло расходуется на нагрев материала, пока не установится равновесие между количеством тепла, сообщаемым материалу, и количеством тепла, расходуемым на испарение влаги. Температура материала при этом возрастает до определенного значения (рис. 1.4б), влажность снижается незначительно (рис. 1.4а), а скорость сушки увеличивается до максимального значения (рис. 1.4в).

Второй период – период сушки с постоянной скоростью (участок В₁С₁, рис. 1.4в). Испарение влаги происходит со свободной поверхности. Влага из внутренних слоев сушеного материала по капиллярам непрерывно поступает к

поверхности и заменяет испарившуюся влагу. Влажность материала интенсивно уменьшается по прямолинейному закону (участок BC, рис. 1.4а) от высокой начальной влажности W_H до критического значения влагосодержания $W_{кр}$, немного превышающего значение предела гигроскопичности $W_{кр} \approx W_{п.н} = 28 - 30\%$, что означает, что вся свободная влага удалена. В этот период сушки температура материала остается постоянной (рис. 1.4в).

Третий период – период падающей скорости сушки (участок кривой C_1B_1 , рис. 1.4в). Происходит удаление связанной влаги из стенок клеток. Скорость поступления влаги из внутренних слоев недостаточна для насыщения поверхности влагой, поэтому скорость сушки постепенно снижается и при понижении влажности материала до равновесной W_p становится равной нулю. В этот период влажность материала уменьшается незначительно (участок CD, рис. 1.4а), а температура материала увеличивается, приближаясь к температуре окружающего газа (рис. 1.4в).

Особое место в теории массообмена при фазовых превращениях занимают исследования процессов испарения со свободной поверхности жидкости [31, 32]. В [31] проанализирована интенсивность испарения со свободной поверхности воды в условиях свободной и вынужденной конвекции при различных скоростях движения окружающего воздуха, температурах воды. Скорость испарения определена по известной массе жидкости Δm_{H_2O} , испарившейся с поверхности за определенный промежуток времени Δt :

$$N_{H_2O}^{me} = \frac{\Delta m_{H_2O}}{A \Delta t},$$

где A – площадь поверхности, на которой происходит тепло- и массоперенос.

В [32] на основе экспериментального исследования процесса испарения воды из растворов аммиачной селитры различной концентрации численно определена удельная скорость испарения воды при комнатной температуре. В диапазоне изменения начальной концентрации 3–4% установлено, что зависимость изменения массы растворов от времен носит линейный характер.

В [33, 34] проведены экспериментальные исследования закономерностей парообразования при температурах ниже температуры кипения на примере испарения со свободной поверхности воды. Определена массовая скорость испарения в больших интервалах времени при различных температурах с целью обоснования стационарности процесса испарения жидкости. Получен известный коэффициент аккомодации в математическом выражении закона Герца-Кнудсена в широком температурном диапазоне для воды.

В [35] представлены полученные в результате экспериментальных исследований значения массовой скорости испарения влаги из древесины лиственных пород деревьев (березы, осины, клена, тополя). Получены зависимости массовой скорости испарения от температуры и выполнен расчет коэффициента аккомодации для соответствующих диапазонов температур. Сделан вывод, что массовая скорость испарения всех образцов древесины с течением времени не изменяется, так как исследуемый временной интервал невелик и процесс на нем является стационарным.

1.2.2 Виды сушильных камер

Сушка является одним из термических способов обезвоживания древесины, при которых в результате теплового воздействия происходит фазовое превращение влаги в пар. В [36] приведен обзор основных способов удаления влаги из древесины.

В зависимости от источника тепла выделяют два основных способа сушки древесины: естественную и искусственную сушку. К естественным способам относят атмосферную и транспирационную (биологическую) сушку, где для удаления влаги используют естественный источник тепла – солнечную радиацию и параметры окружающей среды. При атмосферной сушке в качестве сушильного агента используется атмосферный воздух без искусственного подогрева. Транспирационная сушка достигается в результате прекращения подачи влаги из корневой системы дерева с последующим испарением кроной части капиллярной влаги из ствола.

Для снижения временных затрат и увеличения качества продукции применяется искусственная сушка древесины в сушильных установках, различающиеся как применяемым оборудованием, так и особенностями передачи тепла высушиваемому материалу [37]. По методам переноса тепла к материалу выделяют четыре вида сушки: конвективную, кондуктивную, радиационную и электрическую. Каждый вид сушки может также иметь несколько разновидностей в зависимости от типа сушильного агента.

Сравнительный анализ [38] наиболее распространенных методов сушки древесины показал, что для большинства традиционных методов характерна значительная продолжительностью процесса, высокое энергопотребление, однако, в должной мере не обеспечивается требуемое качество конечной продукции. Подчеркнута необходимость разработки новых способов сушки древесины, позволяющих интенсифицировать процесс.

По совокупности приведенных технико-экономических показателей реальных сушильных установок сделан вывод, что наиболее перспективными методами сушки древесины являются СВЧ-нагрев и комбинирование СВЧ-нагрева с вакуумированием или обдувом древесины потоком горячего воздуха.

В литературе [39] подчеркнута актуальность научных исследований в области повышения энергоэффективности сушильных установок. Идеализированная с позиции энергосбережения схема процесса сушки материалов представлена на рисунке 1.5. Схемой предусмотрен равномерный подвод ко всем точкам материала тепловой энергии, полученной от альтернативных источников, вызывающий испарение влаги, а также вторичное использование тепловой энергии.

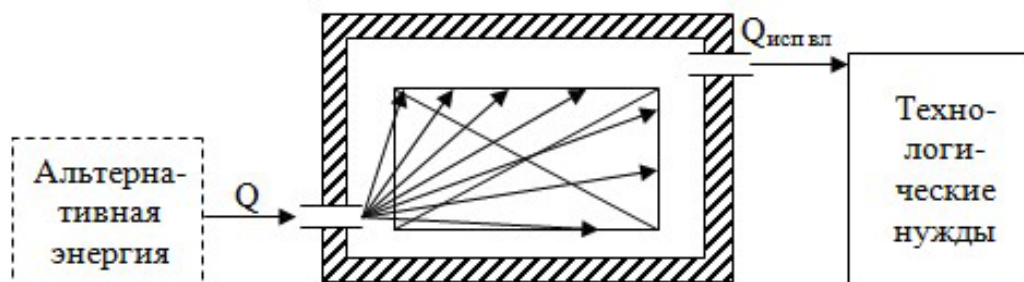


Рисунок 1.5 – Идеализированная схема процесса сушки материалов

Альтернативным источником энергии в предложенной схеме может служить уходящая теплота от сжигания отходов деревообработки. Снижение тепловых потерь в окружающую среду достигается при использовании современных строительных материалов для сушильных аппаратов и сокращения продолжительности сушки при выборе оптимальной технологии. Вторичное использование тепловой энергии при испарении влаги возможно посредством применения тепловых насосов, что позволит сократить затраты на снижение относительной влажности агента сушки в 3-5 раз.

По мнению автора, сушильные установки с контактным методом подвода тепловой энергии в вакуумных аппаратах являются наиболее эффективными с точки зрения снижения потерь тепла в окружающую среду и сокращения продолжительность сушки.

В [40] рассмотрены проблемы использования теплоносителя в сушильных установках. В настоящее время производители вынуждены сушить материал при температуре 50-60 °С в силу конструктивных особенностей камер с водяными калориферами (теплоноситель вода с температурой 90-70°С). Применение пара для древесины в настоящее время весьма ограничено вследствие дороговизны содержания парового хозяйства. Использование электрических лесосушильных камер в современных условиях оказалось нерентабельным. Принимая во внимание уровень цен на энергоносители и доступность видов энергии, имеет смысл говорить о применении разных источников энергии в различных способах сушки.

В настоящее время основным промышленным способом сушки древесины является конвективная сушка, которая достигается конвективной циркуляцией предварительно подогретого воздуха по высушиваемому материалу. В [41] отмечено, что существенное снижение энергозатрат при конвективной сушке достигается при использовании камер с естественной циркуляцией, исключаящих расход электроэнергии на привод вентиляторов, и при оптимизации процессов сушки.

Снижения продолжительности сушки можно добиться за счет применения осциллирующих (ступенчатых, перемежающихся и цикловых) режимов сушки. При этом в период охлаждения происходит интенсивное испарение влаги из древесины, что и позволит управлять процессом влагоудаления. Технология импульсной сушки древесины подробно описана в работе [42]. После прогрева материала последовательно проводятся циклы «импульс – пауза». Стадия «импульс» характеризуется интенсивным процессом испарения влаги с поверхности материала. Движущей силой процесса на этой стадии является влажопроводность. На стадии «пауза» циркуляционные вентиляторы отключаются. Под действием положительного градиента температуры возрастает интенсивность потока влаги к поверхности. Поскольку термоградиентный коэффициент на этой стадии сушки значительно превышает коэффициент влажопроводности, то движение влаги в период «паузы», чем в период «импульса» более интенсивно. Отключение циркуляционных вентиляторов на стадии «пауза» позволяют существенно снизить затраты на электроэнергию при стандартной продолжительности сушки.

Принцип «импульсных» режимов заложен в основе технологии вакуумно-конвективных сушильных камер [43]. Процесс сушки складывается из последовательно чередующихся стадий: нагрев древесины и ее вакуумирование, которое характеризуется интенсивным испарением влаги с поверхности материала. На стадии прогрева происходит накопление тепловой энергии. На стадии вакуумирования – отключение электронагревательных элементов и сушка древесины осуществляется за счет предварительно аккумулированной тепловой энергии.

В [44] уделено внимание выбору аэродинамического режима работы сушильных камер при конвективной сушке древесины, необходимого для повышения энергоэффективности и снижения неравномерного энергоподвода. Отмечено, что формирование неоднородного поля скорости и по подводящему тракту, и при его распределении по всей поверхности высушиваемого материала существенно влияет на тепломассообменные процессы. Для оптимизации

аэродинамики в сушильной установке необходимо снизить скорость сушильного агента в камере, чего можно достигнуть за счет уменьшения перепада давления, создаваемого вентилятором.

В [45, 46, 47] представлена технология сушки древесины с помощью токов сверхвысокой частоты. В отличие от сушки обычными методами, когда нагрев материала до температуры интенсивного парообразования из-за низкой теплопроводности древесины осуществляется постепенно, начиная с его внешних слоев, СВЧ-нагрев происходит практически мгновенно.

Энергия, выработанная магнетроном сушильной камеры, полностью, без потерь, доставляется к воде, которая находится в древесине. В результате воздействия электромагнитного излучения на свободную и связанную влагу происходит активное обезвоживание древесины. Большая часть энергии поглощается непосредственно влагой внутри древесины, что обуславливает более эффективную сушку древесины и значительно сокращает энергетические затраты. Нагрев в этом случае является объемным и относительно равномерным. Продолжительность сушки зависит от мощности облучения, количества генераторов и диаграмм направленности облучающих систем, объема загрузки, разновидности древесины, выбранной частоты СВЧ-облучения [46].

В [48] представлен электрокинетический способ обезвоживания и сушки древесины с учетом ее капиллярной структуры за счет электрического воздействия различных электрических полей, вызывающих классические физико-химические эффекты в капиллярах древесины и определяющих процесс влагопереноса и влагоудаления. Технически этот способ реализуется посредством электротехнологического устройства, работающего по принципу электроосмотического насоса. Устройство состоит из системы электродов, присоединенных к высоковольтному источнику питания, регулируемому по амплитуде и частоте и самого осушаемого материала, (капиллярно-пористого вещества) являющегося основной частью электроосмотического насоса.

Использование предлагаемой технологии позволит в 25-80 раз снизить потребление электроэнергии по сравнению с потреблением электроэнергии современных установок для сушки древесины.

Также была предложена конструкция установки сушки пиломатериалов методом центробежного обезвоживания [49]. Подлежащие обезвоживанию пиломатериалы помещаются в секции цилиндрического полого приводного барабана образованные обечайкой и перегородками. Этот способ сушки характеризуется незначительными капитальными вложениями, минимальными затратами энергии и времени, что способствует уменьшению себестоимости конечного продукта.

В [50] приведено описание энергоэффективного способа сушки древесины, при котором происходит комбинированный нагрев сушильной камеры. Одна часть тепловой энергии производится и подводится в сушильную камеру традиционным способом в теплогенераторе (водогрейном котле, работающем на отходах деревообработки) и теплообменных аппаратах. Другая часть тепловой энергии преобразуется из низкопотенциальной тепловой энергии окружающей среды посредством теплового насоса. Кроме того, в испарителе теплового насоса используется отработанный агент сушки, имеющий повышенные влагосодержание и температуру, что также повышает эффективность работы теплового насоса и снижает энергетические затраты на сушку.

1.3 Математическое моделирование процессов теплопереноса при сушке древесины

По отношению к пористым средам, в т. ч. древесине, различают два качественно отличных друг от друга подхода к математическому моделированию процесса сушки – моделирование «структуры» образца и моделирование поведения образца (процессов тепло- и массопереноса) в [51].

I тип считается наиболее развитым в настоящее время методом математического моделирования процессов тепло- и массопереноса. К нему

относятся все модели влаго- и теплопереноса на основе уравнений А.В. Лыкова для капиллярно-пористого тела. В этом случае геометрического моделирования пористой системы не проводится. Все параметры переноса усредняются по представительному объему высушиваемой среды. При обезвоживании материала в изотермических условиях, для изучения кинетики и динамики влагосодержания используется уравнение диффузии.

II тип математических моделей сушки построен на основе механики многофазных систем. В этом случае при моделировании учитывается не только возможно различное поведение фаз материала при различных внешних воздействиях на образец, но и эффекты взаимодействия фаз – фазовые переходы, теплообмен, капиллярные эффекты. Уравнения для многофазных систем получают объемным усреднением микроуравнений для макроскопических параметров каждой фазы по представительному объему соответствующей фазы.

В [51] отмечено, что развитие математического моделирования процессов сушки сдерживается недостатком знаний о механизмах взаимодействия фаз, изменяющейся в процессе тепло- и массопереноса структуре материала.

Предложена математическая модель для описания процессов тепло- и массообмена в древесине при нагреве, протекающих в материале на этапе сушки при наличии источников теплоты [52]. Интенсивность внутреннего тепловыделения при сушке определяется скоростью изменения массы и тепловыми эффектами протекающих процессов. Тепловой эффект удаления свободной влаги определяется скрытой теплотой парообразования и представляет разность энтальпий сухого насыщенного пара воды в состоянии насыщения. Удаление связанной воды и разрушение ее химических связей с древесным веществом происходит в разных диапазонах температур, поэтому энергетическая составляющая стадий различна. Численные значения тепловых эффектов на отдельных стадиях процесс сушки в рамках исследования были получены методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК).

Создана математическая модель теплофизических процессов, протекающих при сушке древесины, как в трехфазной системе (твердая, жидкая

и газообразная фазы) с учетом различных физических и структурных факторов [53]. В работе принято, что материал трансверсально-изотропен; жидкая фаза практически несжимаема, ее плотность постоянна; газовая фаза состоит из двух компонентов – неконденсирующегося газа и водяного пара, давление в которой определяется по закону Дальтона.

При моделировании для описания переноса жидкой фазы в процессе сушки древесины проведено дополнительное усреднение гидродинамических параметров по объемам свободной воды, воды в тонких прослойках и смачивающихся пленках. Математическая модель содержит уравнения сохранения на межфазных поверхностях. На границе раздела «жидкость-пар» учтена неравновесность фазовых переходов, связанная с тем, что количество пара, испаряющегося с поверхности раздела фаз зависит от кинетических возможностей паровой фазы. Кинетика неравновесных фазовых переходов описана уравнением Герца-Кнудсена. Взаимосвязь между давлением и температурой вдоль линии насыщения – уравнением Клайперона-Клаузиуса. Неравновесная схема фазовых переходов предполагает наличие скачка температур в граничном слое пара.

В [54] разработана модель, описывающая процессы теплообмена при низкотемпературной конвективной сушке. Отмечено, что все исследования с использованием модели коллоидной капиллярно-пористой структуры древесины проводились ранее для изотермических условий. При выполнении вычислительного эксперимента было выявлено, что изменение направления градиента температуры (явление термовлагопроводности) приводит к существенному изменению плотности потока влаги, что в итоге оказывает влияние на общий процесс теплообмена в коллоидном капиллярно-пористом теле. При разработке математической модели использовались расчетные формулы Н.В. Чураева. У древесины, являющейся капиллярно-пористым телом, влагообмен со средой происходит за счет удаления жидкости из капилляров, выходящих на поверхность. Для оценки вклада пленочного

механизма переноса влаги в общий поток в работе использовалась система уравнений Дерягина–Нерпина.

В [55] при проведении математического моделирования импульсных режимов конвективной сушки пиломатериалов учтен нестационарный характер процесса нагрева пиломатериала, а также изменение коэффициентов теплопроводности, влагообмена, теплофизических свойств древесины в процессе сушки и влияние термодиффузии на процесс сушки.

Распределения полей влажности и температуры описаны системой нелинейных дифференциальных уравнений Лыкова для нестационарного внутреннего тепло- и влагопереноса при сушке влажных тел. В качестве метода дискретизации использован метод контрольного объема. Решение дискретных аналогов получено с помощью алгоритма трехдиагональной матрицы. Из анализа построенных кривых сушки сделан вывод, что энергозатраты при импульсном режиме сушки на 23% меньше, чем во время непрерывного режима сушки при той же температуре.

Разработана математическая модель и численный метод расчета тепломассопереноса, фазовых превращений при сушке коллоидных капиллярно-пористых тел в прямоточной ленточной сушилке [56].

Предложенная модель процесса сушки в конвективных аппаратах подобной конструкции, построенная на базе уравнения переноса субстанции (массы, импульса, энергии), полученного из законов сохранения и основных положений механики деформируемого тела, позволила получить решение сопряженной задачи тепломассопереноса и фазовых превращений в высушиваемом материале и в сушильном агенте.

В результате получены поля температур, объемных концентраций и парциальных давлений жидкой, паровой и воздушной фаз в теле и изменения во времени средних значений этих параметров в сушильном агенте в зависимости от скорости движения материала и начальной скорости сушильного агента, а также геометрических параметров влажного тела.

В [57] приведена математическая модель кондуктивной сушки капиллярно-пористых тел при давлении ниже атмосферного. Математическая модель процесса построена как совокупность физических явлений, происходящих при исследуемом способе сушки: тепломассопереноса в парогазовой среде (внешняя задача) и тепломассопереноса внутри материала (внутренняя задача). Для решения внутренней задачи использованы дифференциальные уравнения Лыкова. Поле давления внутри древесины описано уравнением, полученным Г.С. Шубиным.

Математическое описание процесса переноса тепла и массы для парогазовой фазы при непрерывном понижении давления, а также при отсутствии полей скорости, температуры, плотности пара и инертного газа при решении внешней задачи основано на уравнениях материального и теплового баланса. Для нестационарных условий протекания процесса разница между притоком и отводом является накоплением массы и энергии в свободном объеме аппарата.

В итоге получены уравнения скорости изменения парциальных давлений пара и газа и температуры среды, определена объемная производительность системы удаления пара при заданной интенсивности испарения жидкости с поверхности для возможности управления процессами вакуумной сушки.

В [58] при численном исследовании тепломассопереноса при сушке древесины кондуктивным способом в вакуумных аппаратах использована модель фронтального испарения влаги. В процессе сушки в древесине формируется подвижный фронт испарения влаги, поэтому область решения была условно разделена на две зоны: сухую и влажную древесину. С течением времени фронт испарения продвигается вглубь материала, а образовавшийся при этом пар вследствие перепада давления фильтруется в направлении к нагреваемой границе.

Система уравнений, описывающая рассматриваемый процесс, и соответствующие краевые условия описаны в соответствии с общей теорией тепломассопереноса в пористых средах в условиях физико-химических

превращений. Массовая скорость испарения $W_{исп}$ определялась из выражения закона Герца-Кнудсена. Поглощение энергии при испарении влаги в пористой структуре древесины учитывалось ведением в граничное условие произведения $W_{исп} Q_{исп}$ ($Q_{исп}$ – тепловой эффект испарения). При постановке задачи принималось, что поры сообщаются между собой.

В [59] создана одномерная математическая модель для описания процесса СВЧ-сушки древесины на основе механизма влаго- и теплопереноса в древесине.

Для упрощения модели были сделаны следующие предположения: влажная древесина представляет собой капиллярно-пористую среду, состоящую в основном из древесной матрицы, свободной воды, сорбционной воды и водяного пара, которые считаются непрерывными фазами высокого содержания критической влаги; во время вакуумной СВЧ-сушки размер и внутренняя структура древесины не изменятся; скорость перемещения свободной воды и водяного пара происходит по закону Дарси; воздушная масса незначительна из-за непрерывного вакуума; парциальное давление водяного пара равно общему давлению в просвете, водяной пар определяется как идеальный газ; при рассмотрении одномерной картины тепло и влажность передаются в направлении наименьшего размера; локальное тепловое равновесие поддерживается среди паров, свободной жидкой воды и сорбционной воды внутри древесной клетки.

В [60] была проведена проверка экспериментами математической модели, разработанной в [59] на адекватность с помощью микроволновой печи с номинальной мощностью 800 Вт и частотой 2450 МГц, помещенной в вакуумную камеру.

1.4 Особенности сушки лесных горючих материалов

Изучение процесса сушки лесных горючих материалов является важным аспектом как для создания систем прогнозирования лесных пожаров, так и для использования ЛГМ в качестве топлива.

Выделяют два режима сушки – кинетический и диффузионный. Кинетический режим реализуется в случае, когда сушка лимитируется испарением (десорбцией) воды с внешней поверхности пористого влагосодержащего тела. Диффузионный режим имеет место тогда, когда сушка ограничивается переносом влаги или паров непосредственно внутри тела. Сушка ЛГМ в основном характеризуется кинетическим режимом, за исключением сушки толстых веточек при высоких температурах.

При исследовании сушки ЛГМ основными задачами являются определение самого механизма и времени процесса, термокинетических параметров исследуемого вида ЛГМ и его влагосодержания. В рамках исследовательских работ [62, 63, 64] процесс сушки описан с помощью численных и экспериментальных методов при различных граничных условиях.

Важно определить такой показатель как влажность ЛГМ, так как он является ключевым для характеристики топлива и вероятности возникновения пожара. Высокое содержание влаги способствует задержке зажигания и горения, поскольку сначала необходимо испарить находящуюся в ЛГМ жидкость. Содержание в ЛГМ жидкости ведет к увеличению его теплопроводности и теплоемкости. Также пары воды уменьшают потенциал воспламенения, температуру горения и способны разбавить кислород.

Влажность ЛГМ обусловлена существенными признаками данного материала: гигроскопичностью, характеризующей способность вещества притягивать и удерживать молекулы жидкости, особенностью клеточного строения и теплофизическими свойствами частиц ЛГМ. Эти показатели будут отличаться у живых и мертвых топлив, тем самым обуславливая содержание в них влаги. Так, движение воды через частицы мертвого топлива обусловлено процессами испарения из клеточных стенок, диффузией пара через пустоты клеток и его конденсация на стенках ячеек клетки. В итоге вода испаряется с поверхности ЛГМ. Динамика влажности твердого топлива определяется как разность давлений водяного пара в топливной частице и атмосфере. Немного иначе обстоит процесс движения жидкости в живом топливе. Вода перемещается

сквозь клетки через осмос и пустоты клеток путем диффузии и капиллярных сил. Диффузная вода затем подтягивается к листве через проводящую ткань ксилема в древесине путем растягивающего давления, вызванного потенциалом воды, который управляется градиентом давления пара. По мере истощения почвенной воды диффузионный градиент становится более сильным, оказывая более растягивающее давление для преодоления растягивающих сил со стороны почвы на связанную воду [61].

Влажность ЛГМ чаще всего измеряют термогравиметрическим методом, предполагающим сушку образцов в печи с последующим определением разности веса образцов до и после сушки. Метод достаточно прост и эффективен. Наиболее точные результаты можно получить при проведении сушки при более низких температурах (80-85 °С) в течение более длительных периодов времени (48-72 ч), что позволяет предотвращать нежелательные изменения органической структуры топливной частицы.

При моделировании процессов парообмена, адсорбции и десорбции содержание влаги описывают как функцию относительной влажности и температуры среды с учетом типа ЛГМ [62].

Сведения о тепло- и массопереносе в элементах ЛГМ, необходимые для построения математических моделей, получены в ходе экспериментальных исследований. Так в [63] на основании подхода к процессу влагообмена А.В. Лыкова определены коэффициенты удельной влагоемкости и теплопроводности. При анализе экспериментальных данных выявлено, что данные коэффициенты уменьшаются с ростом температуры. Особенно заметно эта зависимость проявляется для хвои кедра, что объясняется особенностями ее внутренней структуры (наличием 2 водоотводов и 12 устьиц).

В [64] собраны результаты экспериментальных и численных исследований испарения жидкости с поверхности ЛГМ хвойных деревьев, характерных для Томской области, для различных случаев: испарение свободной и связанной влаги, в процессе сушки в аэродинамической трубе, испарение капель с шероховатой поверхности. Скорость испарения свободной влаги

сравнивается со скоростью сушки – скоростью испарения влаги, связанной с материалом физико-химическими связями (адсорбционная и осмотическая влаги) и физико-механическими связями (капиллярная влага).

При построении математической модели сушки сделано допущение, что испарение воды в свободном и связанном с ЛГМ состоянии описывается законом Герца-Кнудсена.

При исследовании испарения капле с шероховатой поверхности обнаружено, что между сухой хвоей и водой не происходит массообмена. Живая же хвоя впитывает влагу из капли через устьица, поэтому скорость испарения капли с живой хвои выше скорости испарения капли, расположенной на сухой хвое. У сухой хвои устьица атрофированы и влага не поступает из капли в хвою.

В [65] представлены результаты экспериментальных исследований процессов тепло-и массообмена в период термической подготовки древесной биомассы к сжиганию в топках паровых и водогрейных котлов, выполненных с целью оценки энергозатрат на ее сушку. Установлены массовые скорости поглощения влаги при различных температурах сушильного агента-воздуха (333÷393 К). Показано, что общее время сушки (при одинаковых условиях) практически не зависит от вида биомассы. Установлено, что при начальной влажности лесных горючих материалов от 50% до 70% расход тепла на полное удаление влаги составляет от 10% до 13% от теплотворной способности этих материалов.

Экспериментальные и теоретические исследования процесса сушки ЛГМ проводятся не только в России. Немецкими учеными были экспериментально определены значения равновесного влагосодержания мертвого ЛГМ [66]. Эксперименты проведены с помощью «климатической камеры» над различными насыщенными солевыми растворами. Получены кривые равновесного содержания влаги в образцах подстилки норвежской ели, сосны обыкновенной и европейского бука. Различие между кривыми для хвои и листьев авторы объясняют различиями в физических и химических свойствах материалов.

Приведены результаты экспериментальных исследований процесса конвективной сушки мелкодисперсной биомассы в коническом циклоне [67]. Получены интегральные характеристики процесса обезвоживания. Установлено, что температура сушильного агента оказывает существенное влияние на характеристики и условия удаления влаги. Но процессы обезвоживания лесных отходов в этой статье не изучались.

Выводы по разделу

1. По результатам проведенного анализа научных публикаций сформировано представление об особенностях микростроения древесины лиственных пород деревьев и о ее физических свойствах. Таким образом, выявлены параметры, влияющие на процесс удаления влаги из древесины, как из капиллярно-пористого материала.

2. Установлено, что энергетические характеристики и значительные запасы на территории РФ позволяют использовать растительную биомассу в качестве альтернативного топлива, однако ее недостатком является то, что перед топливоиспользованием необходима подготовка, требующая значительных энергетических затрат.

3. Рассмотрены механизмы удаления влаги в контексте теории сушки и виды сушильных аппаратов, применяемых для термической подготовки различных материалов, в том числе и топлива.

4. Были сделаны выводы о том, что в литературе имеется ряд теоретических и экспериментальных исследований сушки лесных горючих материалов и в связи с общими тенденциями использования альтернативных видов топлива, полученных в т. ч. из растительного сырья, дополнение экспериментальной базы в теории сушки в настоящее время является актуальным. И кроме того, отсутствие или недостаточное количество известных важных констант и коэффициентов затрудняет проведение численных исследований.

5. При теоретическом анализе процессов испарения важно понимать, какие факторы могут оказаться существенными при определении требуемых параметров. Одним из таких факторов является род и структура поверхности испарения. Так имеется достаточное количество исследований испарения со свободной поверхности жидкости, в результате которых получен известный коэффициент аккомодации в математическом выражении закона Герца-Кнудсена в широком температурном диапазоне. Однако древесина имеет сложную капиллярно-пористую структуру, поэтому можно предположить, что значение коэффициента аккомодации для данного материала может быть привязано к его структуре. Поэтому приведенные в научных источниках «чистые» значения коэффициентов вероятнее всего добавляют дополнительную погрешность при их использовании в инженерных расчетах процессов испарения из древесного материала и проектировании сушильных аппаратов.

6. Изучение основных характеристик процесса испарения влаги из пористых структур древесины и листовенного опада имеет решающее значение для практической реализации использования этих материалов как биотоплива, а экспериментально полученные константы станут дополнением к эмпирической базе, к которой зачастую обращаются в теплотехнике при исследовании процессов тепломассопереноса с фазовыми превращениями.

2 Экспериментальное исследование процесса влагоудаления

2.1 Описание экспериментальной установки

При проведении экспериментов использовался сушильный шкаф типа СНОЛ-3,5.3,5.3,5/3-М2У42, предназначенный для сушки различных изделий и материалов при температуре до 350 °С. Материал рабочей камеры – углеродистая сталь с покрытием из термостойкой краски. Нагрев в рабочей камере такой модели сушильного шкафа обеспечивается спиралью резистивного типа (сопротивлением).

Другие основные характеристики сушильного шкафа:

- масса – 80 кг;
- объём рабочей камеры – 42 л (350×350×350 мм);
- напряжение – 220 В;
- частота – 50 Гц;
- мощность – 4,2 кВт.

Измерение текущей массы образцов производилось с помощью лабораторных весов АСЗЕТ (CITIZEN) СУ-1003 на базе электромагнитного датчика (рис. 2.1). Такая модель имеет поддонный крюк, с помощью которого обеспечивается дополнительная опция – получение необходимых данных о массе объекта в гидростатике и в воздухе, что оптимально для разработанной экспериментальной установки.



Рисунок 2.1 – Лабораторные весы АСЗЕТ (CITIZEN) СУ-1003

Чтобы условия проведения эксперимента были стабильными за счет его проведения без открытия дверцы шкафа для контроля массы образца, была сконструирована специальная подставка для весов и подвес. Для непрерывного контроля температуры внутри камеры использовался одноканальный терморегулятор ТРМ500-Щ2.5А.

На рисунке 2.2 представлен схематичный внешний вид экспериментальной установки.

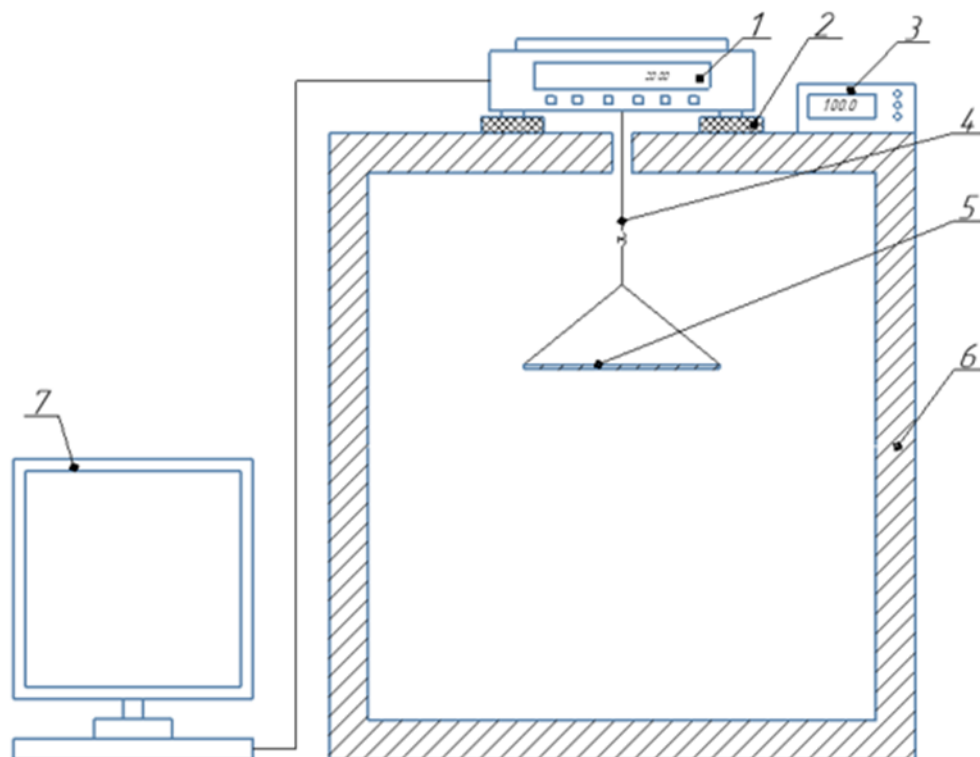


Рисунок 2.2 – Схема экспериментальной установки:

- 1 – весы, 2 – подставка, 3 – терморегулятор, 4 – подвес, 5 – емкость для образца,
6 – корпус сушильной камеры, 7 – ПК

2.2 Образцы для проведения эксперимента

В качестве экспериментальных образцов (рис. 2.3) в представленной исследовательской работе использовались высохшие березовые листья, ветки тополя, липы и березы, предварительно вымоченные в проточной воде в течение суток. Также были проведены эксперименты со свежими листьями тополя и липы. Замачивание сухих образцов является целесообразным мероприятием, так

как таким способом достигаются одинаковые начальные условия проведения эксперимента, а именно – одна и та же относительная влажность (для веток в среднем 45%, а для листьев – 75%).



Рисунок 2.3 – Образцы опада лиственных пород деревьев:

а – листья березы, б – листья тополя, в – листья липы,
г – ветки березы, д – ветки тополя, е – ветки липы

2.3 Методика эксперимента

В ходе работы осуществлено предварительное планирование эксперимента. В соответствии с этим определена методика и последовательность действий при проведении опытов:

1. Заготовка образцов, заключающаяся в предварительном вымачивании листьев в течение суток;
2. Измерение массы поддона, используемого для сушки образцов в качестве емкости, с помощью лабораторных весов (обнуление показаний массы на весах);
3. Наполнение емкости образцом опада (листья, ветки) (рис. 2.3);
4. Включение сушильного шкафа;
5. Установка на терморегуляторе (рис. 2.4) необходимой для проведения эксперимента температуры (60, 80, 100, 120 °С);



Рисунок 2.4 – Терморегулятор TRM500-Щ2.5А

6. Размещение емкости с образцом в сушильной камере;

7. Лабораторные весы измеряют массу образца в течение всего времени сушки и на компьютере в среде Labview отображаются значения через каждую секунду. Далее вручную выбираются значения массы через определенные промежутки времени (10 минут);

8. Измерения производятся до того момента, пока масса образца не перестанет изменяться со временем (считается, что вся влага к этому моменту испарилась);

9. Обработка и анализ полученных результатов.

Проводилось не менее трех серий измерений при постоянных температурах в сушильном шкафу для достижения как можно более точного результата.

3 Обработка результатов измерений

3.1 Расчет массовой скорости испарения

В ходе выполнения этой работы было проведено экспериментальное исследование влияния структуры материала на процесс влагоудаления для 6 различных образцов опада лиственных пород деревьев.

Масса испарившейся влаги определялась через каждые 10 минут для всех образцов и для каждой серии эксперимента по формуле

$$\Delta m = m_i - m_{i+1}, \quad (1)$$

где Δm – масса испарившейся воды, кг;

m_i – масса образца при i -ом взвешивании, кг.

Массовая скорость испарения влаги была найдена расчетным путем исходя из полученных экспериментально данных по формуле

$$w_{\text{исп}} = \Delta m / (S \cdot \Delta \tau), \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}), \quad (2)$$

где Δm – количество испарившейся влаги (равное изменению массы образца) за рассматриваемый период $\Delta \tau$, кг;

S – площадь испарения, м^2 ;

$\Delta \tau$ – рассматриваемый период сушки, $\Delta \tau = 600$ с.

Для листьев принималось, что испарение происходит со всей занимаемой ими поверхности емкости, т. о. площадь испарения равна площади сечения дна поддона. Площадь сечения емкости определялась исходя из ее размеров, a, b (длина и ширина соответственно)

$$S = ab = 14,5 \cdot 12,5 = 181,25 \text{ см}^2 = 0,018125 \text{ м}^2.$$

Для нахождения площади испарения веток каждый образец был условно разбит на несколько цилиндрических частей (рис. 2.5). Такое решение принято в связи с тем, что ветки по длине, как правило, имеют неодинаковый диаметр.

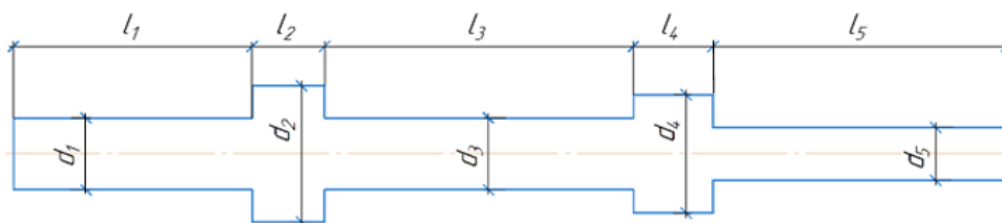


Рисунок 2.5 – Условная разбивка образца для вычисления площади испарения

Площадь испарения одного участка разбиения вычислялась как площадь боковой поверхности цилиндра. Далее эти площади суммировались и таким образом были получены площади каждой из 8 веток по формуле

$$S = \sum_{i=1}^N S_i = \sum_{i=1}^N \pi \cdot d_i \cdot l_i, \text{ м}^2, \quad (3)$$

где d_i – диаметр i -ого участка ветки, м;

l_i – длина i -ого участка ветки, м.

В качестве примера представим расчет массовой скорости испарения влаги из веток березы при температуре 393 К спустя 600 с от начала сушки.

Масса испарившейся влаги (1)

$$\Delta m = 19,421 - 15,798 = 3,623 \text{ г} = 3,623 \cdot 10^{-3} \text{ кг.}$$

Для нахождения площади испарения были найдены площади боковых поверхностей каждой ветки. Так, например, для ветки №1 (3)

$$S_1 = \pi \cdot (4,5 \cdot 34 + 7 \cdot 4 + 4,5 \cdot 31,5 + 6 \cdot 3,5 + 4,5 \cdot 26,5 + 7,5 \cdot 4,5 + 4,5 \cdot 20 + 6 \cdot 3 + 4,5 \cdot 18,5) = 2160,32 \text{ мм}^2.$$

Таким образом, сложив вычисленные площади каждой ветки, была получена суммарная площадь испарения

$$S = 2160,32 + 1847,105 + 1791,37 + 2194,86 + 2245,885 + 2386,4 + 1873,01 + 2018,235 = 16517,185 \text{ мм}^2 = 1,652 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2.$$

Массовая скорость испарения влаги (2)

$$w_{\text{исп}} = \frac{3,623 \cdot 10^{-3}}{1,652 \cdot 10^{-2} \cdot 600} = 36,558 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}.$$

Таблицы расчета площади испарения веток для всех образцов представлены в приложении Б. Полученные экспериментальные данные и рассчитанные массовые скорости испарения влаги приведены в приложении В.

3.2 Расчет погрешностей измерений

Все полученные результаты экспериментов прошли обработку согласно теории погрешностей: отбракованы промахи, определены доверительные интервалы и относительные погрешности измерения (прил. Г).

Представим на примере березовых веток при температуре 393 К расчет погрешности измерений. Исходные данные приведены в виде таблицы 3.1, где массовая скорость испарения влаги представлена как $w_{\text{исп}} \cdot 10^5$, кг/(м² · с).

Таблица 3.1 – Скорость испарения влаги из березовых веток при температуре 393 К

Результаты измерения №1	Результаты измерения №2	Результаты измерения №3
36,558	33,701	34,486
39,434	39,454	43,807
15,005	17,907	19,630
1,019	1,865	2,060
0,474	0,489	0,302
0,343	0,419	0,427
0,182	0,219	0,166
0,222	0,289	0,270
0,111	0,229	0,156
0,131	0,130	0,166

1. Вычисляется среднее арифметическое результатов измерений

$$\bar{w} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i, \quad (4)$$

где w_i – значение скорости испарения для i -ого измерения;

n – количество измерений.

$$\bar{w}_1 = (36,558 + 33,701 + 34,486)/3 \cdot 10^{-5} = 34,915 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$\bar{w}_2 = (39,434 + 39,454 + 43,807)/3 \cdot 10^{-5} = 40,898 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$\bar{w}_3 = (15,005 + 17,907 + 19,630)/3 \cdot 10^{-5} = 17,514 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$\bar{w}_4 = (1,019 + 1,865 + 2,060)/3 \cdot 10^{-5} = 1,648 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$\bar{w}_5 = (0,474 + 0,489 + 0,302)/3 \cdot 10^{-5} = 0,421 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$\bar{w}_6 = (0,343 + 0,419 + 0,427)/3 \cdot 10^{-5} = 0,396 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$\bar{w}_7 = (0,182 + 0,219 + 0,166)/3 \cdot 10^{-5} = 0,189 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$\bar{w}_8 = (0,222 + 0,289 + 0,270)/3 \cdot 10^{-5} = 0,261 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$\bar{w}_9 = (0,111 + 0,229 + 0,156)/3 \cdot 10^{-5} = 0,165 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$\bar{w}_{10} = (0,131 + 0,130 + 0,166)/3 \cdot 10^{-5} = 0,142 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

2. Находится средняя квадратичная погрешность отдельного результата при трех измерениях:

$$n_S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{w} - w_i)^2}{n-1}}, \quad (5)$$

$$n_{S_1} = \sqrt{\frac{(34,915 - 36,558)^2 + (34,915 - 33,701)^2 + (34,915 - 34,486)^2}{3-1}} \times 10^{-5} = 1,476 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$n_{S_2} = \sqrt{\frac{(40,898 - 39,434)^2 + (40,898 - 39,454)^2 + (40,898 - 43,807)^2}{3-1}} \times 10^{-5} = 2,519 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$n_{S_3} = \sqrt{\frac{(17,514 - 15,005)^2 + (17,514 - 17,907)^2 + (17,514 - 19,630)^2}{3-1}} \times 10^{-5} = 2,338 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$n_{S_4} = \sqrt{\frac{(1,648 - 1,019)^2 + (1,648 - 1,865)^2 + (1,648 - 2,060)^2}{3-1}} \cdot 10^{-5} = 0,553 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$n_{S_5} = \sqrt{\frac{(0,421 - 0,474)^2 + (0,421 - 0,489)^2 + (0,421 - 0,302)^2}{3-1}} \cdot 10^{-5} = 0,104 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$n_{S_6} = \sqrt{\frac{(0,396 - 0,343)^2 + (0,396 - 0,419)^2 + (0,396 - 0,427)^2}{3-1}} \cdot 10^{-5} = 0,046 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$n_{S_7} = \sqrt{\frac{(0,189 - 0,182)^2 + (0,189 - 0,219)^2 + (0,189 - 0,166)^2}{3-1}} \cdot 10^{-5} = 0,027 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$n_{S_8} = \sqrt{\frac{(0,261 - 0,222)^2 + (0,261 - 0,289)^2 + (0,261 - 0,270)^2}{3-1}} \cdot 10^{-5} = 0,035 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$n_{S_9} = \sqrt{\frac{(0,165 - 0,111)^2 + (0,165 - 0,229)^2 + (0,165 - 0,156)^2}{3 - 1}} \cdot 10^{-5} =$$

$$= 0,060 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$n_{S_{10}} = \sqrt{\frac{(0,142 - 0,131)^2 + (0,142 - 0,130)^2 + (0,142 - 0,166)^2}{3 - 1}} \cdot 10^{-5} =$$

$$= 0,021 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

3. Вычисляется относительное уклонение «подозрительного» (v_k) измерения, выраженное в долях n_S :

$$v_k = \left| \frac{\bar{w} - w_k}{n_S} \right|, \quad (6)$$

$$1) v_1 = \left| \frac{34,915 - 36,558}{1,476} \right| = 1,113; \quad v_2 = \left| \frac{34,915 - 33,701}{1,476} \right| = 0,822;$$

$$v_3 = \left| \frac{34,915 - 34,486}{1,476} \right| = 0,291;$$

$$2) v_4 = \left| \frac{40,898 - 39,434}{2,519} \right| = 0,581; \quad v_5 = \left| \frac{40,898 - 39,454}{2,519} \right| = 0,573;$$

$$v_6 = \left| \frac{40,898 - 43,807}{2,519} \right| = 1,155$$

$$3) v_7 = \left| \frac{17,514 - 15,005}{2,338} \right| = 1,073; \quad v_8 = \left| \frac{17,514 - 17,907}{2,338} \right| = 0,168;$$

$$v_9 = \left| \frac{17,514 - 19,630}{2,338} \right| = 0,905;$$

$$4) v_{10} = \left| \frac{1,648 - 1,019}{0,553} \right| = 1,137; \quad v_{11} = \left| \frac{1,648 - 1,865}{0,553} \right| = 0,392;$$

$$v_{12} = \left| \frac{1,648 - 2,060}{0,553} \right| = 0,745;$$

$$5) v_{13} = \left| \frac{0,421 - 0,474}{0,104} \right| = 0,510; \quad v_{14} = \left| \frac{0,421 - 0,489}{0,104} \right| = 0,654;$$

$$v_{15} = \left| \frac{0,421 - 0,302}{0,104} \right| = 1,144;$$

$$6) v_{16} = \left| \frac{0,396 - 0,343}{0,046} \right| = 1,152; \quad v_{17} = \left| \frac{0,396 - 0,419}{0,046} \right| = 0,500;$$

$$v_{18} = \left| \frac{0,396 - 0,427}{0,046} \right| = 0,674;$$

$$7) v_{19} = \left| \frac{0,189 - 0,182}{0,027} \right| = 0,259; \quad v_{20} = \left| \frac{0,189 - 0,219}{0,027} \right| = 1,111;$$

$$v_{21} = \left| \frac{0,189-0,166}{0,027} \right| = 0,852;$$

$$8) v_{22} = \left| \frac{0,261-0,222}{0,035} \right| = 1,114; \quad v_{23} = \left| \frac{0,261-0,289}{0,035} \right| = 0,800;$$

$$v_{24} = \left| \frac{0,261-0,270}{0,035} \right| = 0,257;$$

$$9) v_{25} = \left| \frac{0,165-0,111}{0,060} \right| = 0,900; \quad v_{26} = \left| \frac{0,165-0,229}{0,060} \right| = 1,067;$$

$$v_{27} = \left| \frac{0,165-0,156}{0,060} \right| = 0,150;$$

$$10) v_{28} = \left| \frac{0,142-0,131}{0,021} \right| = 0,524; \quad v_{29} = \left| \frac{0,142-0,130}{0,021} \right| = 0,571;$$

$$v_{30} = \left| \frac{0,142-0,166}{0,021} \right| = 1,143.$$

4. Находится v_{\min} , v_{\max} по известному количеству измерений, при этом удобно воспользоваться учебным пособием [68, прил. 4]:

$$n = 3; \quad v_{\min} = 1,41; \quad v_{\max} = 1,41.$$

5. Для отбраковки v_k сравнивается с v_{\min} и v_{\max} : если $v_k < v_{\min}$ – измерение x_k оставить; если $v_k > v_{\max}$ – измерение x_k отбраковать (промах); если $v_{\min} < v_k < v_{\max}$ – измерение x_k можно и оставить и отбраковать.

В данном примере все измерения можно оставить.

6. Находится среднее квадратичное отклонение среднего арифметического (погрешность результата серии измерений):

$${}^n S_{\bar{w}} = {}^n S / \sqrt{n}, \quad (7)$$

$${}^n S_{\bar{w}1} = 1,476 \cdot 10^{-5} / \sqrt{3} = 0,852 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)};$$

$${}^n S_{\bar{w}2} = 2,519 \cdot 10^{-5} / \sqrt{3} = 1,454 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)};$$

$${}^n S_{\bar{w}3} = 2,338 \cdot 10^{-5} / \sqrt{3} = 1,350 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)};$$

$${}^n S_{\bar{w}4} = 0,553 \cdot 10^{-5} / \sqrt{3} = 0,319 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)};$$

$${}^n S_{\bar{w}5} = 0,104 \cdot 10^{-5} / \sqrt{3} = 0,060 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)};$$

$${}^n S_{\bar{w}6} = 0,046 \cdot 10^{-5} / \sqrt{3} = 0,027 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)};$$

$${}^n S_{\bar{w}7} = 0,027 \cdot 10^{-5} / \sqrt{3} = 0,016 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)};$$

$${}^n S_{\bar{w}8} = 0,035 \cdot 10^{-5} / \sqrt{3} = 0,020 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)};$$

$${}^nS_{\bar{w}_9} = 0,060 \cdot 10^{-5} / \sqrt{3} = 0,034 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$${}^nS_{\bar{w}_{10}} = 0,021 \cdot 10^{-5} / \sqrt{3} = 0,012 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

7. Задаются доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$ и находят табличное значение коэффициента Стьюдента [68, прил. 1]

$$t(\alpha; n) = t(0,95; 3) = 4,3.$$

8. Вычисляется абсолютная погрешность результата серии измерений:

$$\Delta w = {}^nS_{\bar{w}} \cdot t(\alpha, n), \quad (8)$$

$$\Delta w_1 = 0,852 \cdot 10^{-5} \cdot 4,3 = 3,665 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$\Delta w_2 = 1,454 \cdot 10^{-5} \cdot 4,3 = 6,254 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$\Delta w_3 = 1,350 \cdot 10^{-5} \cdot 4,3 = 5,804 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$\Delta w_4 = 0,319 \cdot 10^{-5} \cdot 4,3 = 1,373 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$\Delta w_5 = 0,060 \cdot 10^{-5} \cdot 4,3 = 0,258 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$\Delta w_6 = 0,027 \cdot 10^{-5} \cdot 4,3 = 0,114 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$\Delta w_7 = 0,016 \cdot 10^{-5} \cdot 4,3 = 0,068 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$\Delta w_8 = 0,020 \cdot 10^{-5} \cdot 4,3 = 0,086 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$\Delta w_9 = 0,034 \cdot 10^{-5} \cdot 4,3 = 0,148 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$\Delta w_{10} = 0,012 \cdot 10^{-5} \cdot 4,3 = 0,052 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

9. Находится относительная погрешность результата серии измерений:

$$\delta_w = \Delta w / \bar{w}, \quad (9)$$

$$\delta_{w1} = \frac{3,665}{34,915} = 0,105; \quad \delta_{w2} = \frac{6,254}{40,898} = 0,153; \quad \delta_{w3} = \frac{5,804}{17,514} = 0,331;$$

$$\delta_{w4} = \frac{1,373}{1,648} = 0,833; \quad \delta_{w5} = \frac{0,258}{0,421} = 0,613; \quad \delta_{w6} = \frac{0,114}{0,396} = 0,289;$$

$$\delta_{w7} = \frac{0,068}{0,189} = 0,358; \quad \delta_{w8} = \frac{0,086}{0,261} = 0,330; \quad \delta_{w9} = \frac{0,148}{0,165} = 0,896;$$

$$\delta_{w10} = \frac{0,052}{0,142} = 0,363.$$

10. Результат записывается в виде:

$$w = \bar{w} \pm \Delta w,$$

$$w_1 = (34,915 \pm 3,665) \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$w_2 = (40,898 \pm 6,254) \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$w_3 = (17,514 \pm 5,804) \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$w_4 = (1,648 \pm 1,373) \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$w_5 = (0,421 \pm 0,258) \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$w_6 = (0,396 \pm 0,114) \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$w_7 = (0,189 \pm 0,068) \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$w_8 = (0,261 \pm 0,086) \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$w_9 = (0,165 \pm 0,148) \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$w_{10} = (0,142 \pm 0,052) \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

3.3 Обезразмеривание массовой скорости испарения

Как правило, абсолютные значения величин дают недостаточно информации для качественного понимания процесса. Для обобщения выводов и использования полученных результатов для более широкого круга прикладных задач массовые скорости испарения были приведены к безразмерному виду. Это позволит применить результаты исследования для решения производственных задач (например, выбора температурного и временного режимов) при конвективной сушке в промышленных масштабах.

Безразмерная скорость испарения имеет вид

$$w' = \frac{\Delta m'}{\Delta \tau' \cdot S'}, \quad (10)$$

где $\Delta m'$ – безразмерная масса, $\Delta \tau'$ – безразмерное время, S' – безразмерная площадь.

Безразмерную массу представим как

$$\Delta m' = \frac{\Delta m}{\Delta m_0}, \quad (11)$$

где Δm_0 – полная масса влаги в образце, Δm – масса испарившейся влаги (за прошедшие 10 минут).

Как сказано выше, за параметр отнесения принята полная масса влаги в образце. Использование результатов в безразмерном виде для дальнейшего

получения размерных величин, необходимых для выбора режимов сушки на производстве, объективно в случае соответствия подлежащего высушиванию материала начальным условиям представленного эксперимента, а именно, относительной влажности, соответствующей 45% для древесины и 75% для лиственного опада.

Безразмерное время представим как

$$\Delta\tau' = \frac{\Delta\tau}{\Delta\tau_0}, \quad (12)$$

где $\Delta\tau_0$ – принятый период сушки ($\Delta\tau_0 = 600$ с), $\Delta\tau$ – рассматриваемый промежуток времени.

За характерный масштаб площади взят 1 м^2 (т. е. $S' = S/1 \text{ м}^2$).

Проведя математические преобразования с формулами (10-12), получено конечное выражение для вычисления безразмерной скорости

$$w' = w_{\text{исп}} \cdot \frac{\Delta\tau_0}{\Delta m_0}. \quad (13)$$

3.4 Расчет коэффициента аккомодации

Коэффициентом аккомодации, A , называют величину, характеризующую поведение молекул газа или пара при их соударении с поверхностью жидкого или твёрдого тела [69].

С одной стороны, этот коэффициент обозначает долю «конденсирующихся» молекул из общего числа молекул, ударяющихся о поверхность в 1 м^2 в течение 1 секунды. В отличие от чистых твёрдых металлических поверхностей, у которых почти каждый атом металла (пара), ударившийся о поверхность, конденсируется, и коэффициент аккомодации почти равен 1, для других тел он зависит от температуры, массы молекул газа (пара), чистоты поверхности и может варьироваться в весьма широких пределах от нескольких сотых до единицы.

С другой стороны, коэффициент аккомодации характеризует отношение энергии, действительно полученной молекулами газа от твёрдого тела, к

количеству энергии, которое они получили бы, если при ударе устанавливалось бы тепловое равновесие между твёрдым телом и отскакивающими от него молекулами газа (пара). Если все молекулы газа испытывают при ударе упругое зеркальное отражение, то $A=0$; если же все ударяющиеся о поверхность твёрдого тела молекулы временно адсорбируются этой поверхностью, и лишь затем отрываются от неё, то $A=1$. Величина коэффициента аккомодации зависит от природы и состояния поверхности, от природы газа (пара) и от температуры.

Скорость, с которой молекулы газа ударяются о поверхность, может быть вычислена на основании кинетической теории из уравнения Герца-Кнудсена

$$w_{\text{исп}} = \frac{A \cdot (P^{\text{H}} - P^*)}{\sqrt{\frac{2\pi RT}{M}}}, \quad (14)$$

где A – коэффициент аккомодации;

P^{H} – давление насыщенного пара, Па;

P^* – парциальное давление, Па;

R – универсальная газовая постоянная, $R = 8314$ Дж/(кмоль · К);

T – температура вещества, К;

M – молекулярная масса, г/моль.

Подставив полученные значения массовой скорости испарения, найденные экспериментально, в уравнение (14) можно определить парциальное давление и коэффициент аккомодации. В уравнении две неизвестных величины, поэтому необходимо воспользоваться уравнением состояния

$$P^{\text{H}} \cdot V = (m_{\text{с.в}} + m_{\text{H}_2\text{O}}) \frac{R \cdot T}{M}, \quad (15)$$

где P^{H} – давление насыщенного пара, Па;

V – внутренний объем сушильной камеры, $V = 0,42$ м³;

$m_{\text{с.в}}$ – масса сухого воздуха, кг;

$m_{\text{H}_2\text{O}}$ – масса водяного пара, кг;

M – молярная масса влажного воздуха, г/моль.

Так как известны давление насыщения при заданной температуре, объем сушильной камеры и масса испарившейся влаги, можно найти из уравнения состояния (15) массу сухого воздуха для каждого образца при определенной температуре.

Масса сухого воздуха находится по формуле

$$m_{c.в} = \left(\frac{P^H \cdot V}{R \cdot T} - \frac{m_{H_2O}}{M_{H_2O}} \right) \cdot M_{c.в}, \quad (16)$$

где P^H – давление насыщения, определяемое из таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара [70] по температуре влажного воздуха;

T – температура в сушильной камере, К;

m_{H_2O} – масса испарившейся влаги из всего образца, кг;

M_{H_2O} – молекулярная масса воды, $M_{H_2O} = 18$ г/моль;

$M_{c.в}$ – молекулярная масса сухого воздуха, $M_{c.в} = 29$ г/моль.

Для нахождения общей массы влаги, испарившейся со всего образца, необходимо найти массу испарившейся влаги в начальный момент времени в сушильной камере, которая находится по формуле

$$m_{H_2O(0)} = d \cdot m_{c.в(0)}, \quad (17)$$

где d – влагосодержание влажного воздуха;

$m_{c.в(0)}$ – масса сухого воздуха в камере в начальный момент времени, кг.

Влагосодержание влажного воздуха

$$d = 0,622 \cdot \frac{\varphi P^H}{B - \varphi P^H}, \quad (18)$$

где B – атмосферное давление, $B = 101325$ Па;

φ – относительная влажность воздуха, принимаемая $\varphi = 50$ %.

Массу сухого воздуха в камере находим по формуле

$$m_{c.в(0)} = V \cdot \rho_{c.в}, \quad (19)$$

где $\rho_{c.в}$ – плотность сухого воздуха, кг/м³.

Плотность сухого воздуха в помещении находится по формуле

$$\rho_{\text{с.в}} = \frac{B - \varphi P^{\text{H}}}{\frac{R \cdot T}{M_{\text{с.в}}}}, \quad (20)$$

где P^{H} – давление насыщенного пара при начальной температуре в камере $t=25^{\circ}\text{C}$ составляет $P^{\text{H}} = 3170$ Па;

T – начальная температура в камере, $T = 298$ К.

Зная массу испарившейся влаги в начальный момент и массу испарившейся влаги с образца, можно найти общую массу влаги в камере

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \Delta m + m_{\text{H}_2\text{O}(0)}, \quad (21)$$

где Δm – масса испарившейся из образца влаги в течение 10 минут.

Из уравнения (11) находим молекулярную массу влажного воздуха

$$M = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}} + \left(\frac{P^{\text{H}} \cdot V}{R \cdot T} - \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \right) \cdot M_{\text{с.в.}}}{\frac{P^{\text{H}} \cdot V}{R \cdot T}}. \quad (22)$$

Получив значения общей массы испарившейся влаги в образце, массу сухого воздуха и молекулярный вес можно найти объемные и массовые доли испарившейся влаги.

Массовые доли водяного пара

$$g_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{H}_2\text{O}} + \left(\frac{P^{\text{H}} \cdot V}{R \cdot T} - \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \right) \cdot M_{\text{с.в.}}}. \quad (23)$$

Объемные доли водяного пара

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = g_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \frac{M}{M_{\text{H}_2\text{O}}}. \quad (24)$$

Теперь зная объемные доли испарившейся влаги и давление насыщенного пара, можно найти парциальное давление по формуле

$$P^* = r_{\text{H}_2\text{O}} \cdot P^{\text{H}}. \quad (25)$$

Зная парциальное давление и скорость испарения влаги из образцов, находится коэффициент аккомодации из (14)

$$A = \frac{w_{\text{исп}} \cdot \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}}}{P^{\text{H}} - P^*}. \quad (26)$$

Для примера представим расчет коэффициента аккомодации для веток березы при температуре 393 К спустя 600 с от начала сушки.

Плотность сухого воздуха в помещении (20)

$$\rho_{с.в} = \frac{101325 - 0,5 \cdot 3170}{\frac{8314 \cdot 298}{29}} = 1,167 \text{ кг/м}^3.$$

Масса сухого воздуха в камере (19)

$$m_{с.в(0)} = 0,42 \cdot 1,167 = 0,489 \text{ кг.}$$

Влагосодержание влажного воздуха (18)

$$d = 0,622 \cdot \frac{0,5 \cdot 3170}{101325 - 0,5 \cdot 3170} = 0,00988 \text{ кг/кг.}$$

Масса испарившейся влаги в начальный момент времени в сушильной камере (17)

$$m_{H_2O(0)} = 0,00988 \cdot 0,489 = 0,00483 \text{ кг.}$$

Общая масса влаги в камере (21)

$$m_{H_2O} = 0,00344 + 0,00483 = 0,00827 \text{ кг.}$$

Из таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара [70] по температуре влажного воздуха 393 К определено, что $P^H = 198665 \text{ Па}$.

Молекулярная масса влажного воздуха (22)

$$M = \frac{0,00827 + \left(\frac{198665 \cdot 0,42}{8314 \cdot 393} - \frac{0,00827}{18} \right) \cdot 29}{\frac{198665 \cdot 0,42}{8314 \cdot 393}} = 28,802 \text{ г/моль.}$$

Массовая доля водяного пара (23)

$$g_{H_2O} = \frac{0,00827}{0,00827 + \left(\frac{198665 \cdot 0,42}{8314 \cdot 393} - \frac{0,00827}{18} \right) \cdot 29} = 0,011.$$

Объемная доля водяного пара (24)

$$r_{H_2O} = 0,011 \cdot \frac{28,802}{18} = 0,018.$$

Парциальное давление (25)

$$P^* = 0,018 \cdot 198665 = 3576 \text{ Па.}$$

Коэффициент аккомодации (26)

$$A = \frac{34,915 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 8314 \cdot 393}{28,802}}}{198665 - 3576} = 1,511 \cdot 10^{-6}.$$

Результаты расчёта коэффициента аккомодации представлены в приложении Д в виде таблиц для 6 образцов при температурах в сушильной камере 333 – 393 К.

4 Анализ полученных результатов

4.1 Массовые скорости испарения влаги

На рисунках 4.1–4.6 приведены зависимости массовой скорости испарения влаги от времени для шести изученных видов древесной и лиственной биомассы при различных температурах сушильного агента (воздуха).

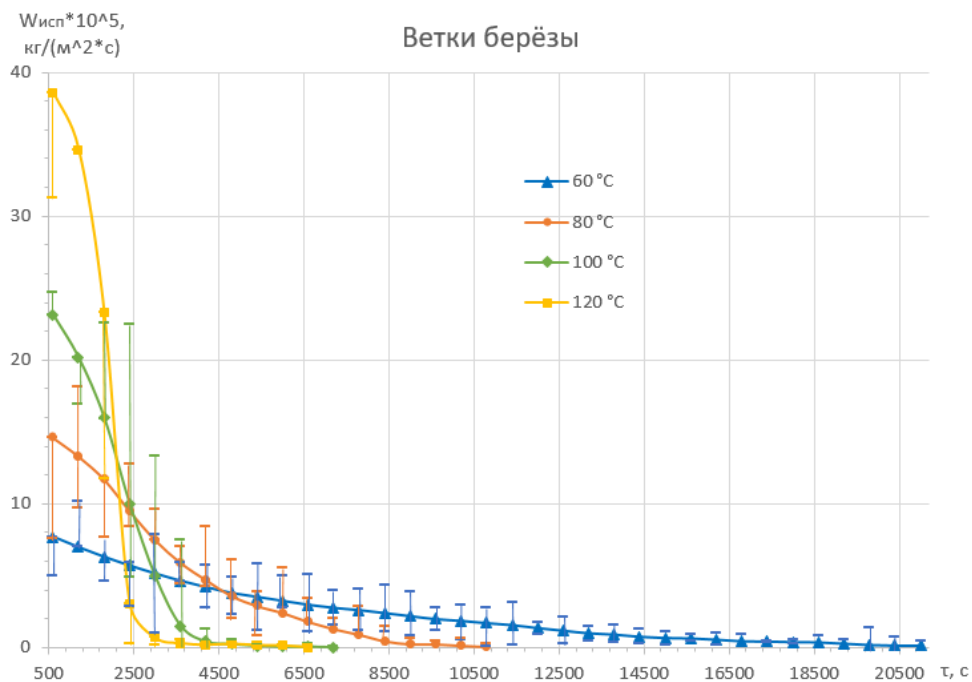


Рисунок 4.1 – Кривые скорости влагоудаления для веток берёзы

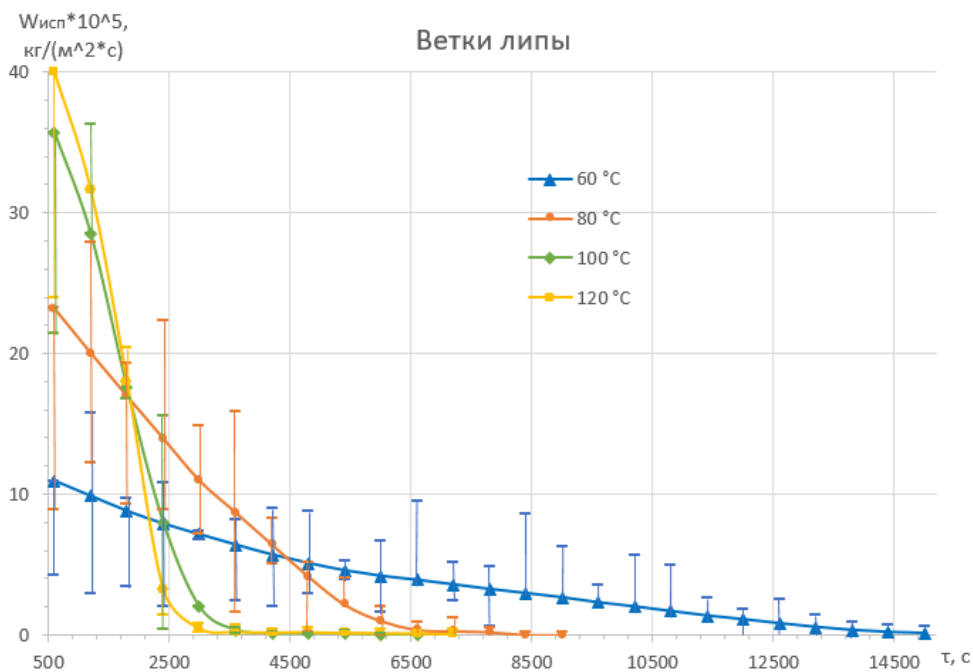


Рисунок 4.2 – Кривые скорости влагоудаления для веток липы

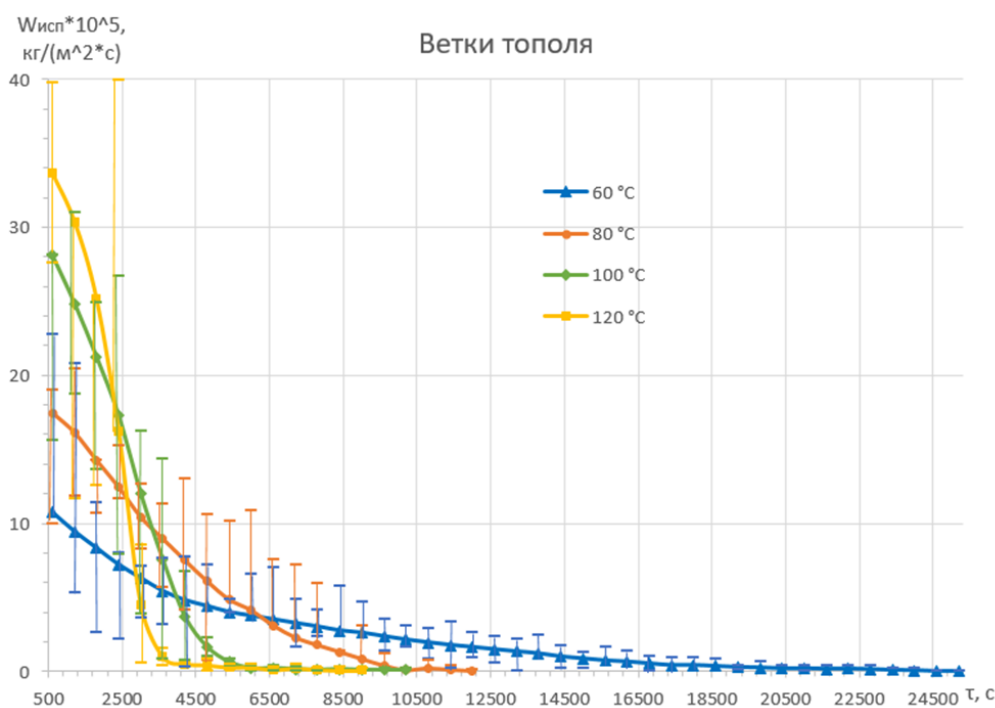


Рисунок 4.3 – Кривые скорости влагоудаления для веток тополя

Из полученных кривых (рис. 4.1–4.3) было определено время полного удаления свободной влаги из древесных образцов (веток) при различных температурах воздуха в сушильной камере, результаты сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Время полного удаления свободной влаги из древесного опада, с

	60 °C	80 °C	100 °C	120 °C
Береза	15000	9000	4100	3300
Липа	13600	6600	3600	3000
Тополь	16500	9600	5400	3800

Исходя из представленных выше результатов можно отметить, что на всем рассматриваемом температурном диапазоне время полного удаления свободной влаги из веток тополя больше, чем у веток березы и липы. Это различие связано с тем, что свойство влагоотдачи зависит от индивидуального строения материала, а соответственно от породы древесины, для каждой из которой характерна своя внутренняя структура (размеры и количество пор, капилляров).

Анализ зависимостей скорости испарения влаги от времени (рис. 4.1–4.3) также показывает влияние температуры сушильного агента на интенсивность

процесса удаления влаги. Замечено, что в среднем при снижении температуры сушильного агента на 60 °С время полного удаления свободной влаги, а вместе с ним и общее время сушки, значительно увеличивается (примерно в 4,5 раза) для всех рассмотренных видов лиственных деревьев (табл. 4.1).

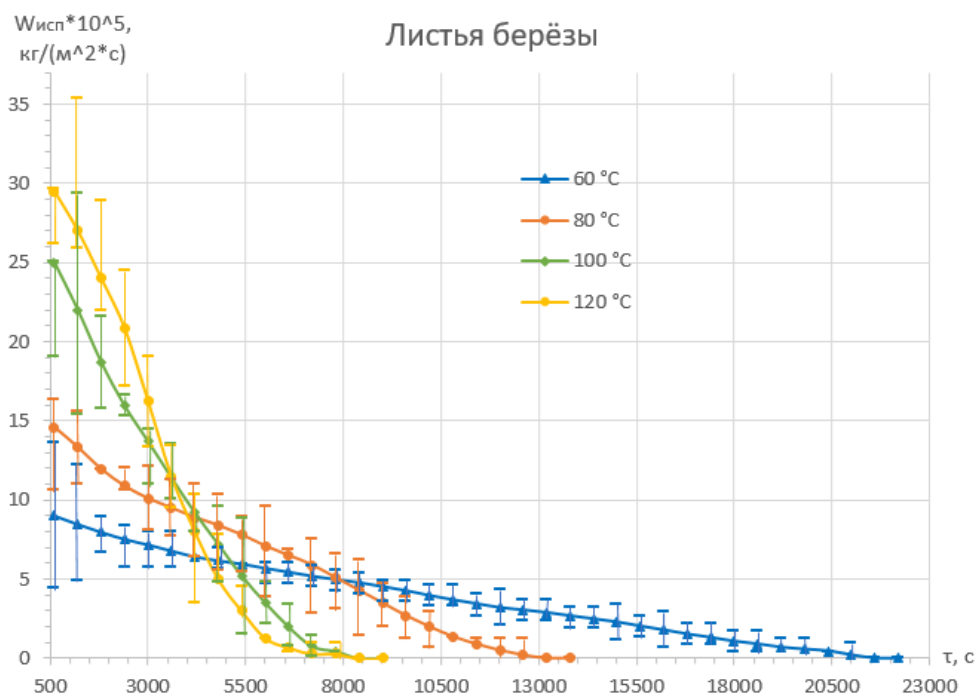


Рисунок 4.4 – Кривые скорости влагоудаления для листьев берёзы

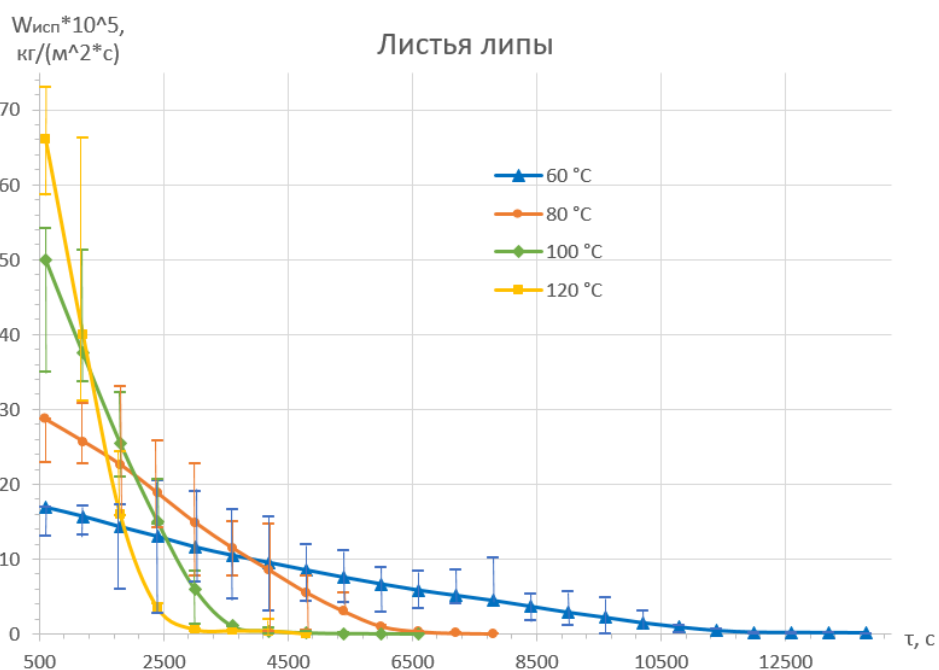


Рисунок 4.5 – Кривые скорости влагоудаления для листьев липы

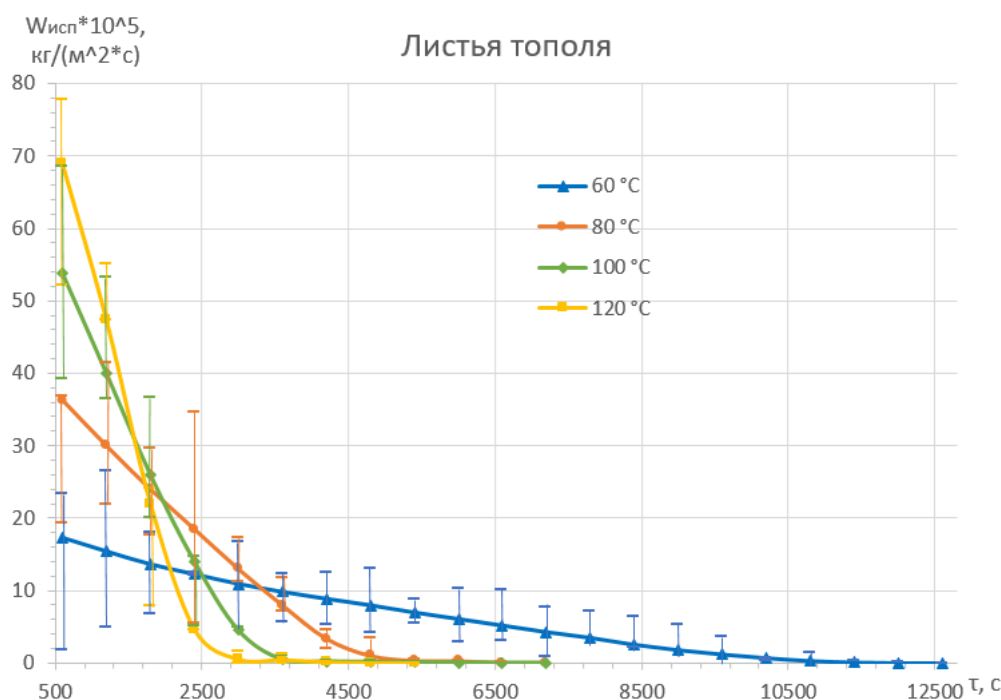


Рисунок 4.6 – Кривые скорости влагоудаления для листьев тополя

Из полученных кривых (рис. 4.4–4.6) также было определено время полного удаления свободной влаги из листовых образцов при различных температурах воздуха в сушильной камере, результаты сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Время полного удаления свободной влаги из листового опада, с

	60 °C	80 °C	100 °C	120 °C
Береза	20400	12500	7500	6500
Липа	10900	6100	3700	2900
Тополь	10100	4900	3600	2800

Сравнивая полученные результаты для листьев (табл. 4.2) с теми, что были получены для веток (табл. 4.1), можно отметить, что для соответствующих пород соотношение времени полного удаления свободной влаги различается. Так на всем рассматриваемом температурном диапазоне оно наибольшее из рассмотренных образцов для листьев березы.

Влияние температуры сушильного агента на интенсивность процесса удаления влаги из листьев аналогично закономерности, выявленной при сушке веток. В среднем при снижении температуры сушильного агента на 60 °C время

полного удаления свободной влаги увеличивается примерно в 3,5 раза для всех рассмотренных листьев (табл. 4.2).

Из совокупного анализа кривых скорости удаления влаги (рис. 4.1–4.6) следует подчеркнуть, что продолжительность третьего периода сушки, когда удаляется только оставшаяся связанная влага, у листьев меньше, чем у веток. Например, при температуре 60 °С для березовых листьев она составляет 600 с, а для березовых веток – 6000 с (в 10 раз больше). Это объясняется тем, что в листьях содержится в основном лишь свободная влага, доля связанной в них ничтожно мала, в то время как в древесине максимально может содержаться ее до 30 %.

Полученные результаты, как говорилось ранее, приведены к безразмерному виду. Дополнительно построены безразмерные кривые скорости влагоудаления (рис. 4.7–4.8), которыми можно воспользоваться для определения скорости удаления влаги из материала любого количества в каждом из периодов сушки.

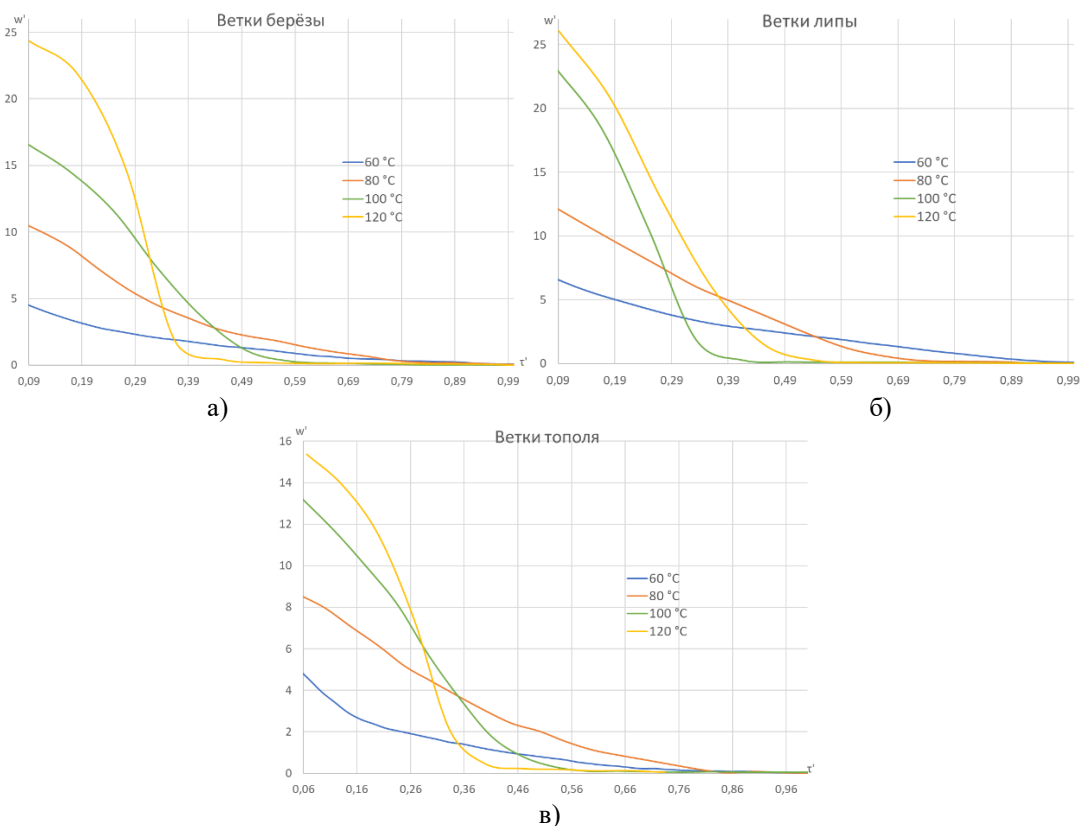


Рисунок 4.7 – Безразмерные кривые скорости влагоудаления для веток:

а – береза, б – липа, в – тополь

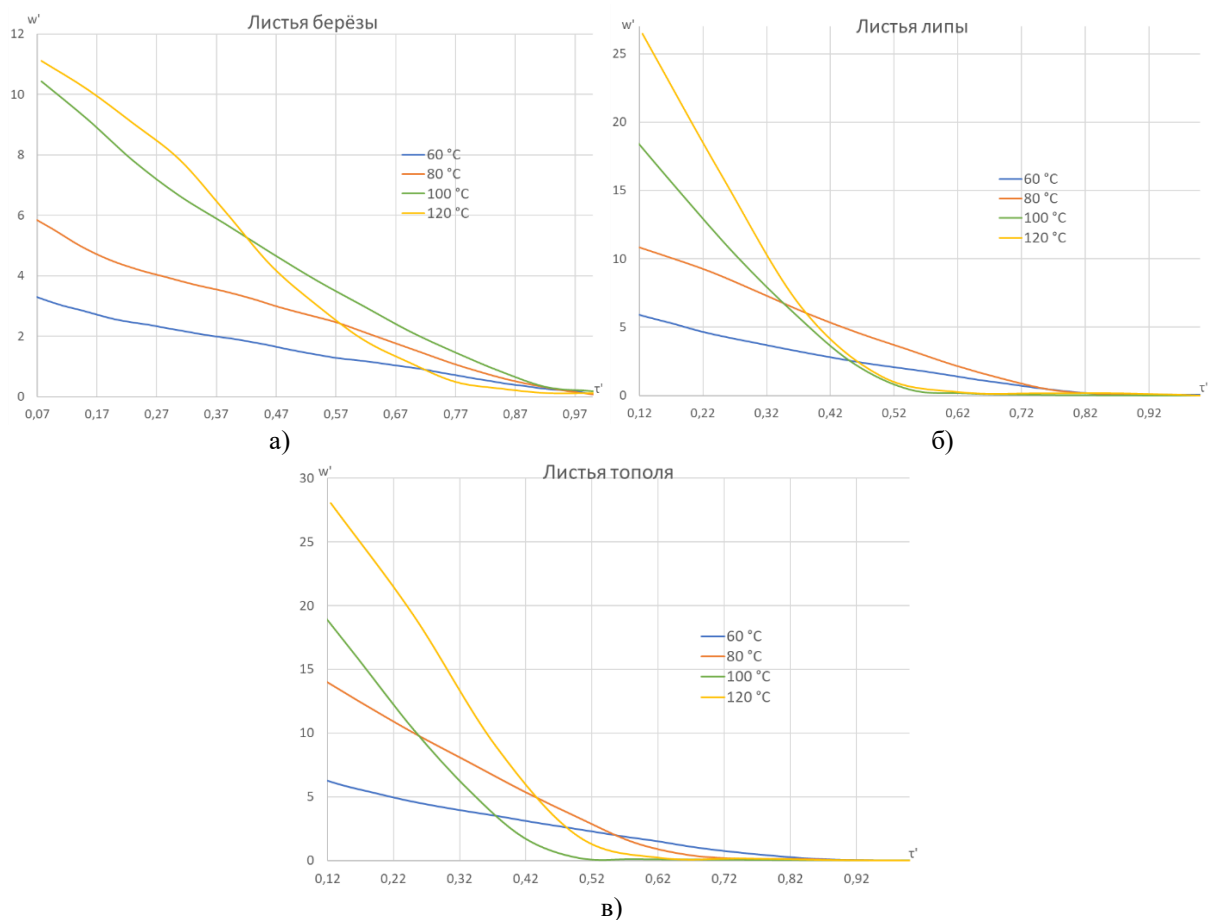


Рисунок 4.8 – Безразмерные кривые скорости влагоудаления для листьев:

а – береза, б – липа, в – тополь

Очевидно, что безразмерные кривые (рис. 4.7–4.8) сохраняют особенности характера протекания процесса испарения влаги из образцов, отображенные в размерном виде (рис. 4.1–4.6). На них также можно выделить температурные режимы процесса сушки с условной границей их раздела в зависимости от внешней температуры. При температуре сушильного агента менее 100 °C весь процесс удаления влаги значительно растягивается во времени. А при температуре воздуха в камере больше либо равно 100 °C выход влаги начинается почти сразу с высокой интенсивностью и заканчивается быстрее.

Результаты этих экспериментов представлены в иной компоновке на рисунках 4.9–4.16, иллюстрирующей влияние породы высушиваемого материала на скорость влагоудаления для каждой из четырех температур воздуха в сушильной камере.

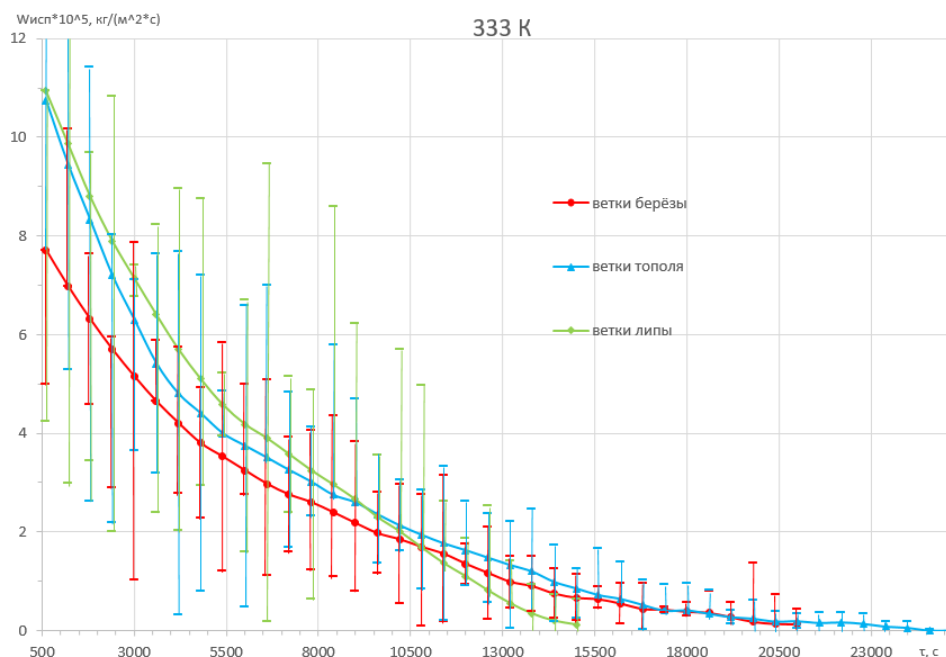


Рисунок 4.9 – Кривые скорости влагоудаления для веток при 333 К

Из рисунка 4.9 видно, что при 60 °С в первом периоде сушки скорость испарения влаги для рассматриваемых образцов наибольшая у веток липы, а наименьшая у березы. При переходе на второй период сушки эта закономерность меняется: у липы становится скорость испарения влаги ниже, чем у остальных образцов.

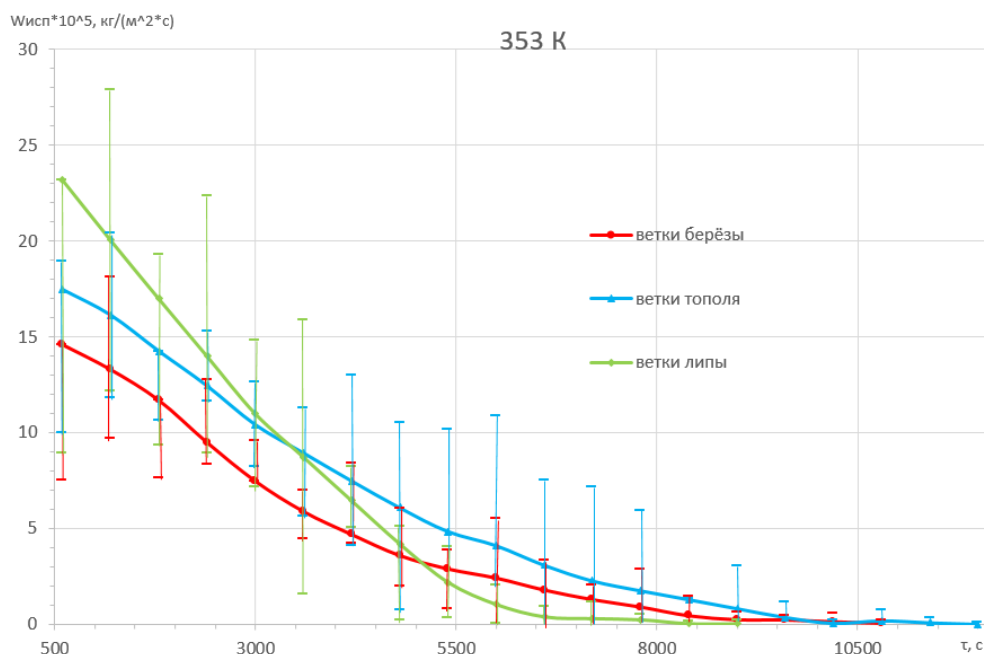


Рисунок 4.10 – Кривые скорости влагоудаления для веток при 353 К

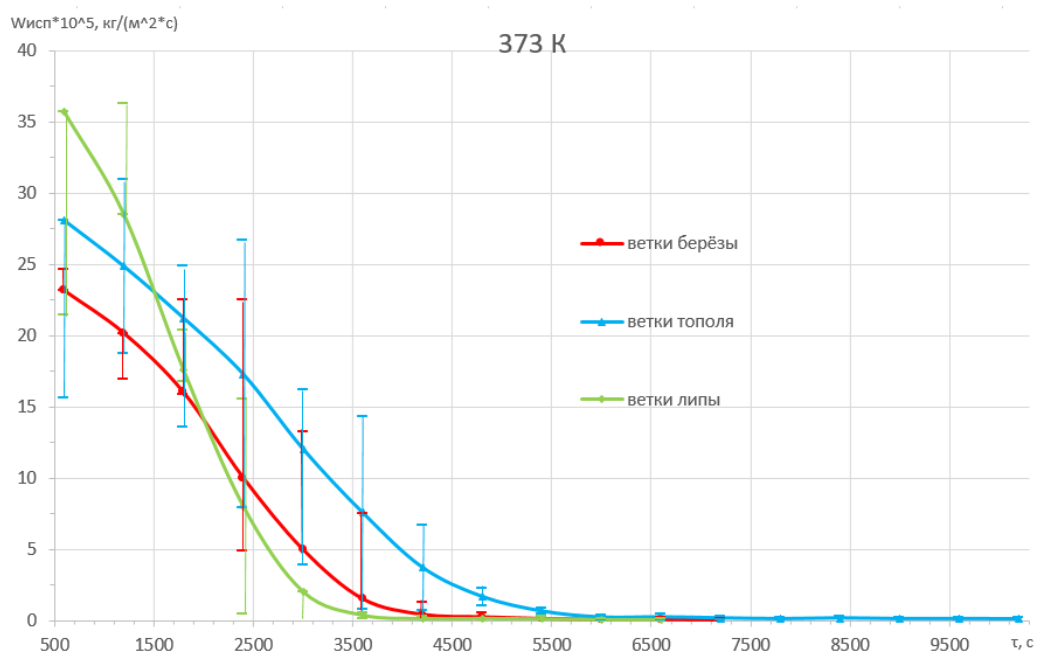


Рисунок 4.11 – Кривые скорости влагоудаления для веток при 373 К

Рисунки 4.10–4.11 наглядно показывают, что при 80 °С и при 100 °С в поведении кривых скорости удаления влаги аналогично 60 °С.

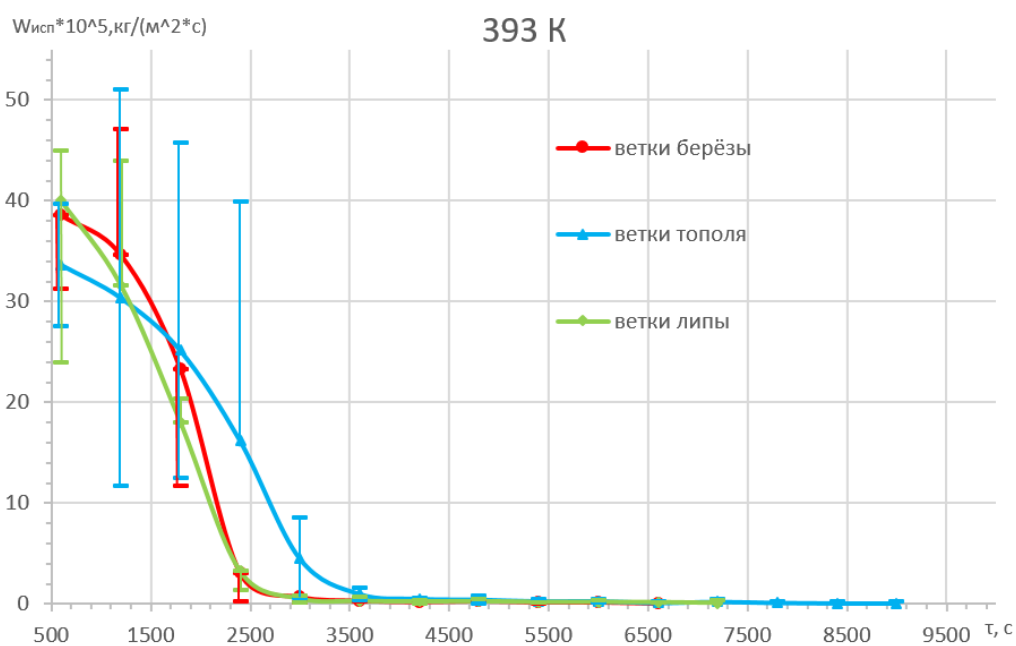


Рисунок 4.12 – Кривые скорости влагоудаления для веток при 393 К

Из рисунка 4.12 видно, что при 120 °С в первом периоде сушки, когда испаряется только свободная влага, у веток тополя скорость испарения влаги наименьшая, а на втором периоде – наибольшая из представленных образцов.

Из полученных кривых (рис. 4.9–4.12) было определено полное время сушки образцов древесного опада при различных температурах воздуха в сушильной камере, результаты сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Полное время сушки древесного опада, с

	60 °С	80 °С	100 °С	120 °С
Береза	21000	10800	7200	6600
Липа	15000	9000	7200	6600
Тополь	25200	12000	10200	9000

Следует отметить, что полное время сушки (при одинаковых условиях) зависит от вида биомассы. Из таблицы 4.3 видно, что оно для различных пород в основном различается более чем на 15%. Так, временные затраты на сушку тополя выше на всем температурном диапазоне. Соответственно, можно сказать, что древесный опад различных типов лиственных деревьев не может быть высушен в одной сушильной камере без риска пиролиза или воспламенения одного из них.

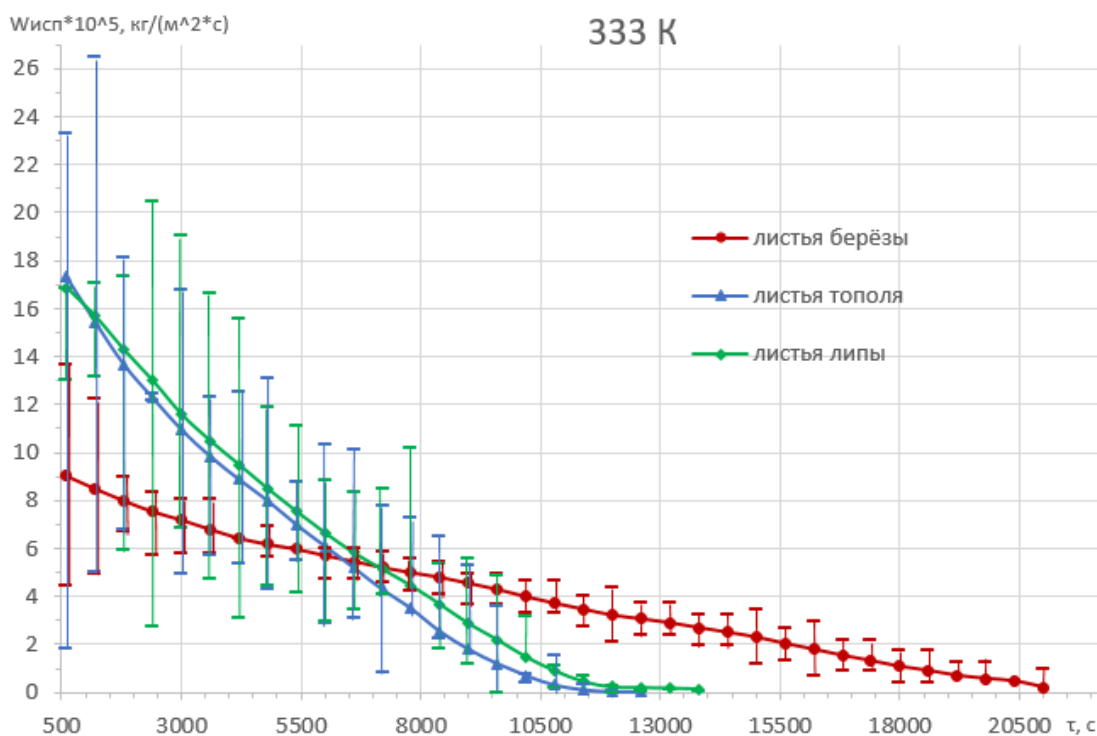


Рисунок 4.13 – Кривые скорости влагоудаления для листьев при 333 К

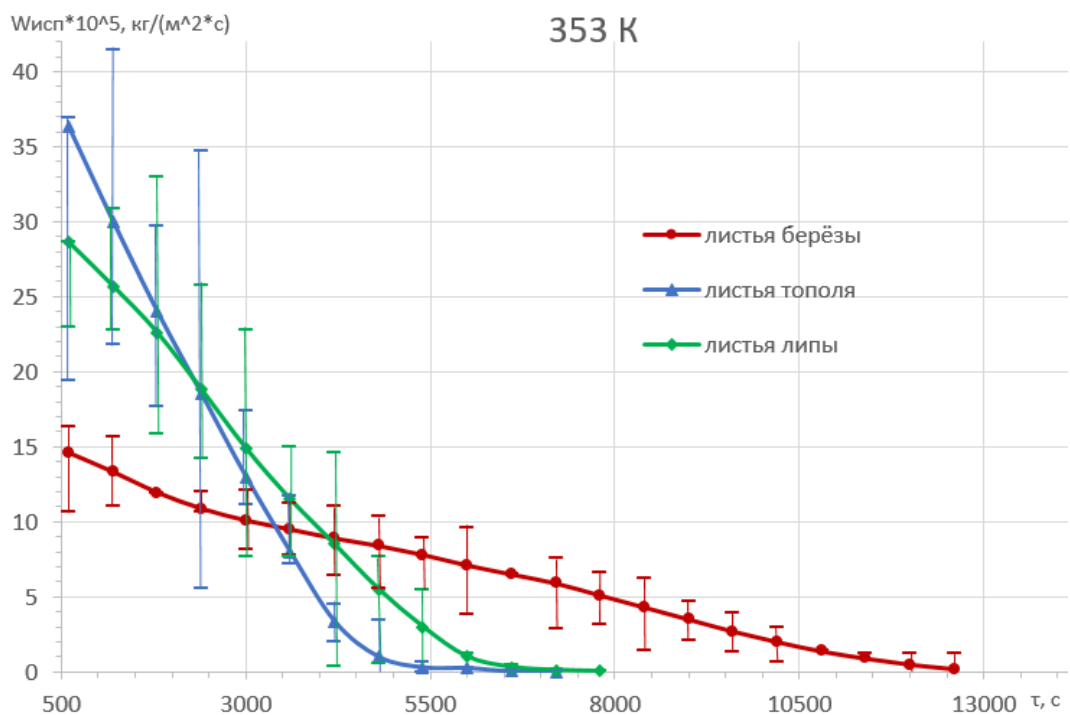


Рисунок 4.14 – Кривые скорости влагоудаления для листьев при 353 К

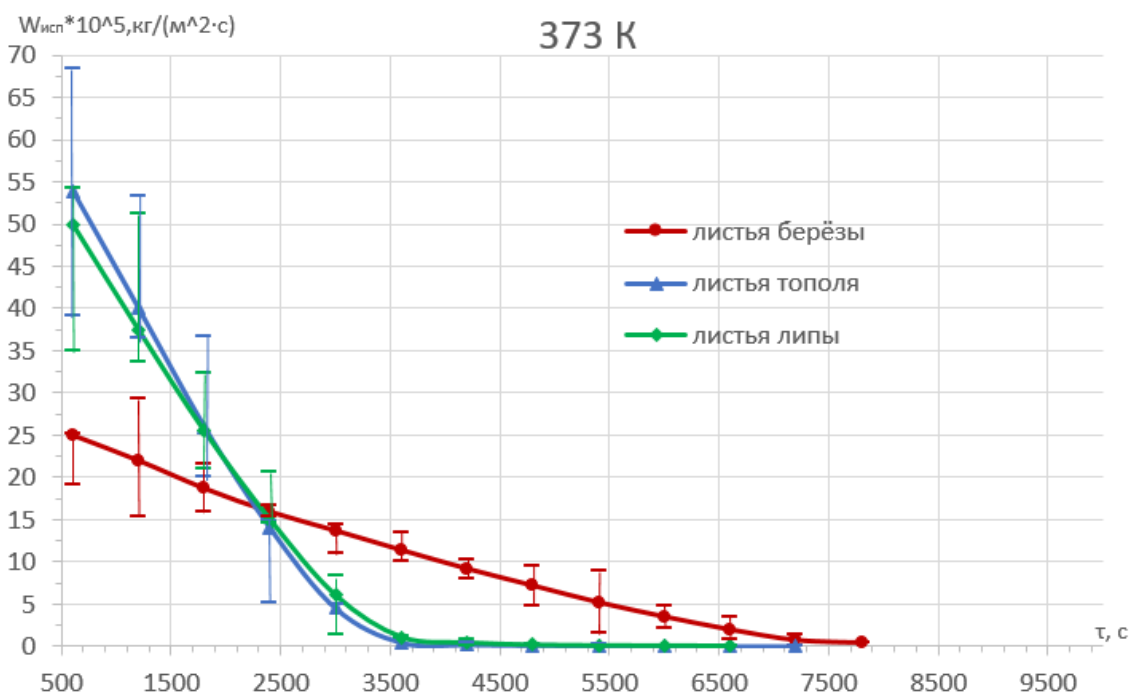


Рисунок 4.15 – Кривые скорости влагоудаления для листьев при 373 К

Характер изменения скорости удаления влаги из листовых образцов (рис. 4.13–4.16) практически не отличается для всех рассмотренных температур сушильного агента в камере: в первом периоде сушки скорость влагоудаления наименьшая у листьев берёзы, а при переходе на второй период она становится наибольшей по сравнению с остальными образцами.

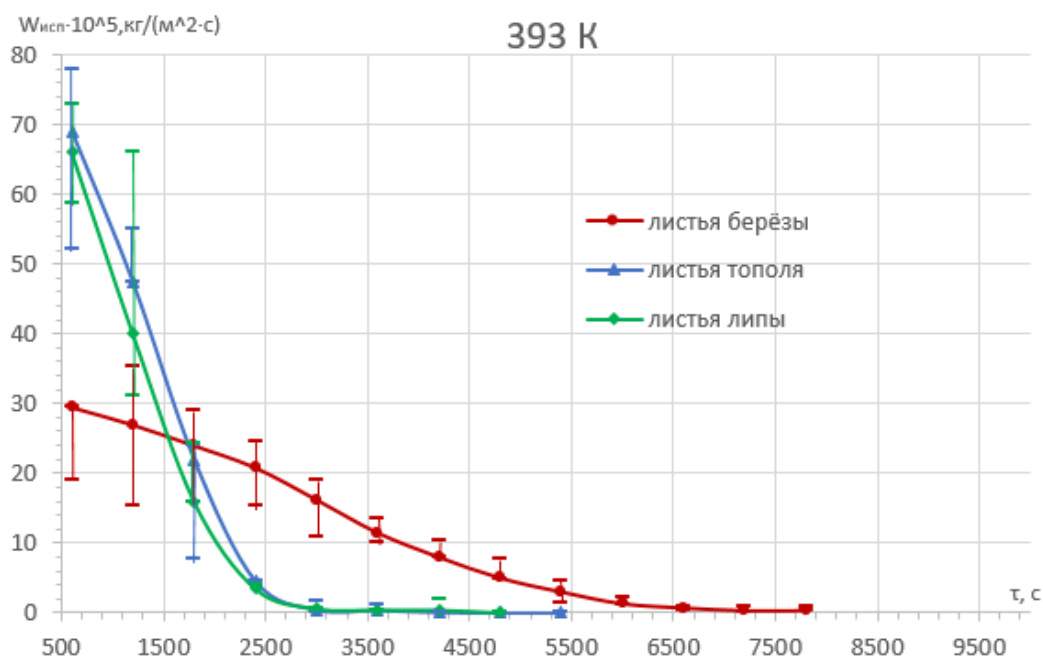


Рисунок 4.16 – Кривые скорости влагоудаления для листьев при 393 К

Из полученных кривых (рис. 4.13–4.16) также было определено полное время сушки образцов листовенного опада при различных температурах воздуха в сушильной камере, результаты сведены в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Полное время сушки листовенного опада, с

	60 °С	80 °С	100 °С	120 °С
Береза	21000	12600	7800	7200
Липа	13800	7800	6600	4800
Тополь	12600	7200	6600	4800

Проанализировав данные из таблицы 4.4, можно отметить, что полное время сушки (при одинаковых условиях) для листовенного опада также зависит от вида биомассы. Очевидно, что временные затраты на сушку листьев берёзы значительно выше на всем температурном диапазоне, в то время как для листьев тополя и липы они отличаются между собой не более чем на 9%. Таким образом, листву березовых деревьев следует высушивать отдельно от остальных образцов во избежание риска возникновения пожароопасной ситуации.

Аналогичные кривые скорости влагоудаления из листовенного и древесного опада, приведенные к безразмерному виду, также были построены для приведенной выше компоновки результатов (рис. 4.17–4.18). Эти

безразмерные кривые отображают особенности протекания процесса испарения влаги в зависимости от породы высушиваемых образцов при различных четырех температурах, представленные ранее в размерном виде (рис. 4.9–4.16).

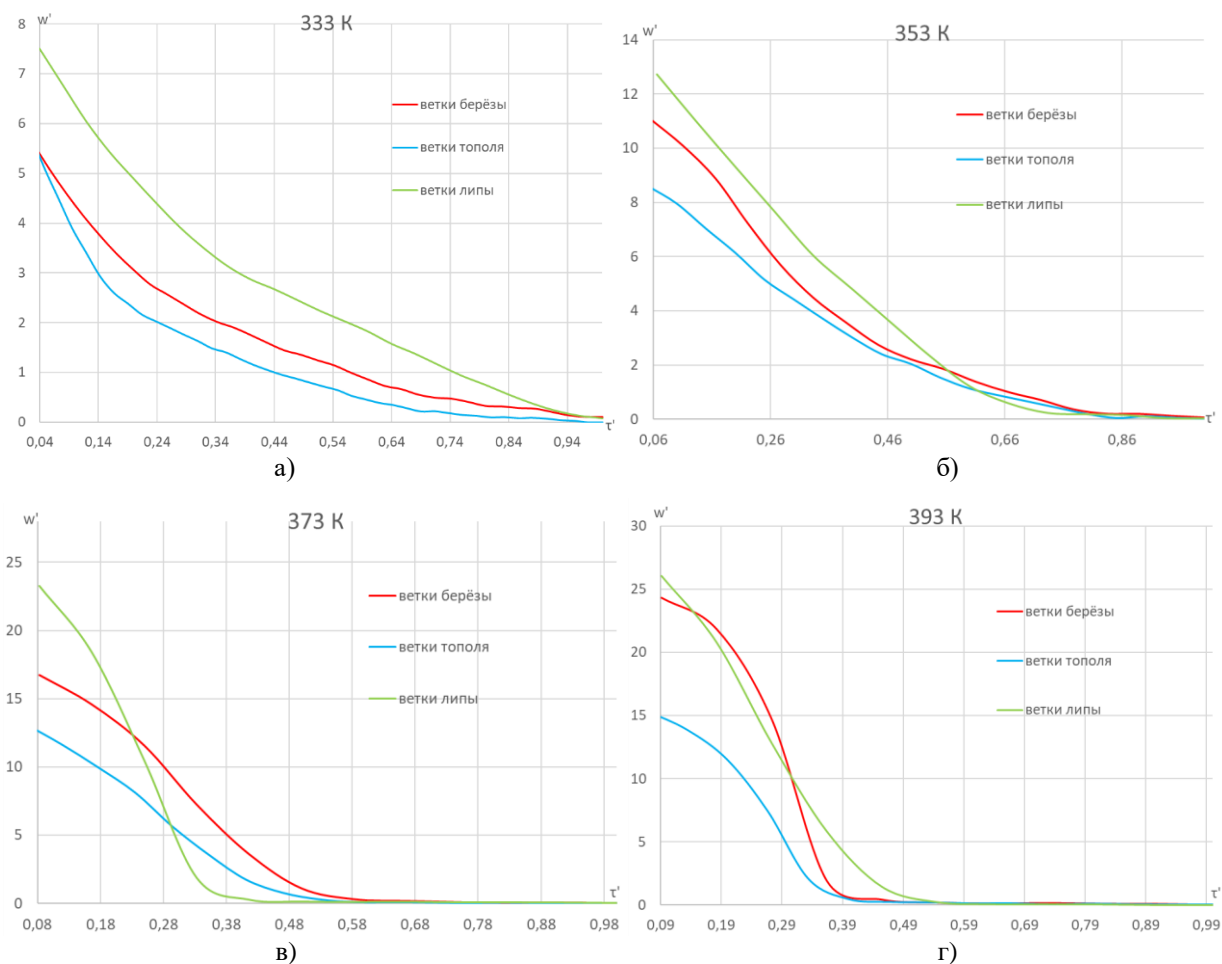


Рисунок 4.17 – Безразмерные кривые скорости влагоудаления для веток:

а – 333 К (60 °С), б – 353 К (80 °С), в – 373 К (100 °С), г – 393 К (120 °С)

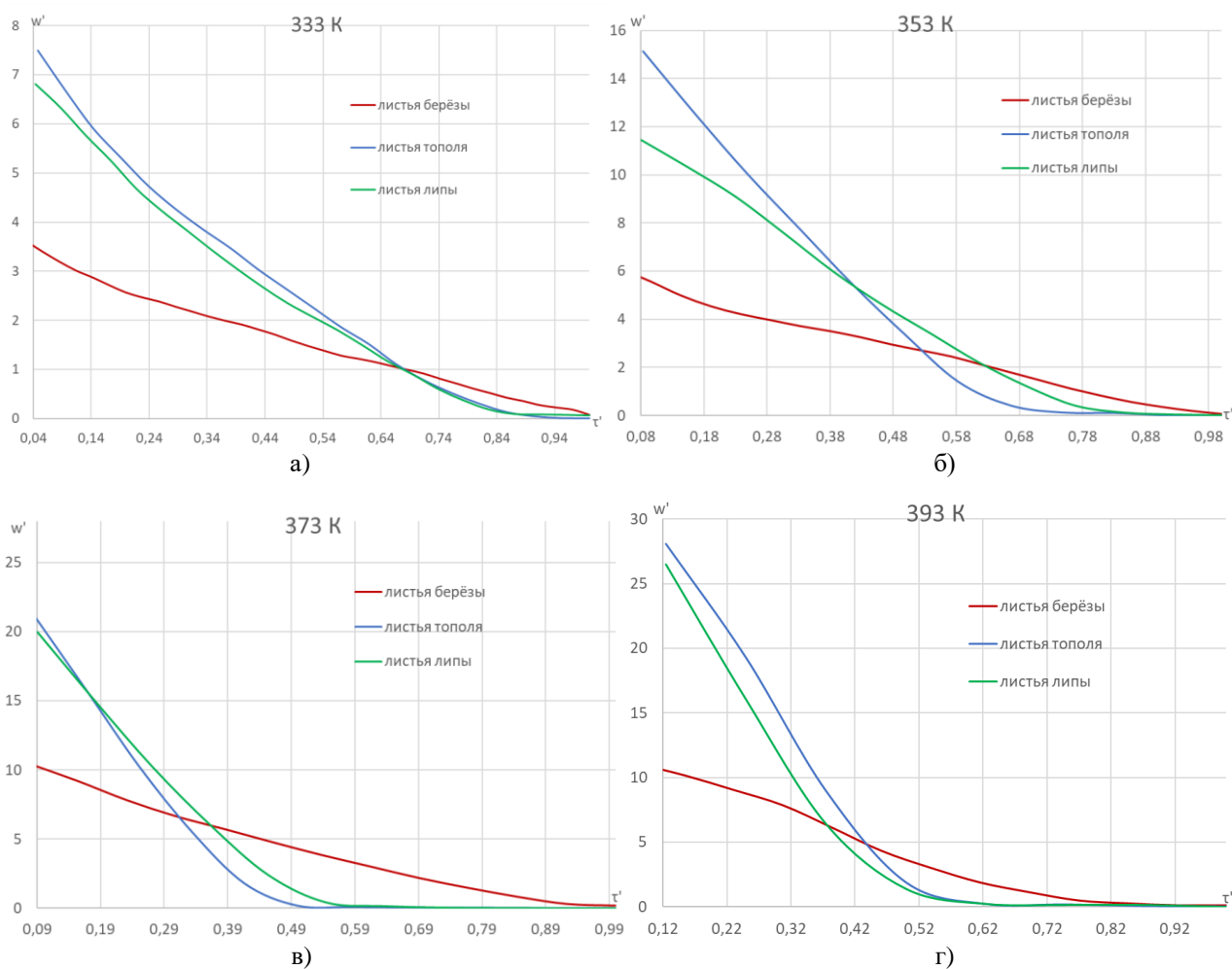


Рисунок 4.18 – Безразмерные кривые скорости влагоудаления для листьев:
а – 333 К (60 °С), б – 353 К (80 °С), в – 373 К (100 °С), г – 393 К (120 °С)

4.2 Коэффициент аккомодации

Проведен сравнительный анализ (табл. 4.5–4.6) полученных с использованием молекулярно-кинетической теории результатов расчета коэффициента аккомодации для опада лиственных пород деревьев (прил. Д) и для испаряющейся со свободной поверхности водопроводной воды, рассмотренной ранее в бакалаврской работе в качестве экспериментального образца.

Для того чтобы оценить влияет ли структура поверхности испарения на величину коэффициента аккомодации, были взяты значения этих коэффициентов при одинаковой массовой скорости испарения влаги при температуре 60 °С. Для температур 80 °С, 100 °С и 120 °С такое сравнение не

представляется возможным за неимением экспериментальных данных для воды при конкретно этих температурах.

Таблица 4.5 – Сравнение коэффициентов аккомодации для древесного опада и воды

	Вода	Ветки березы	Вода	Ветки липы	Вода	Ветки тополя
Т, К	333					
$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	8,568		9,364		7,023	
$A \cdot 10^6$	3,727	3,806	4,093	4,172	3,035	3,282

Из таблицы 4.5 видно, что при одинаковой скорости испарения коэффициент аккомодации для влагоудаления со свободной поверхности воды в среднем ниже на 3,8%, чем из древесного опада лиственных пород деревьев при температуре 60 °С.

Таблица 4.6 – Сравнение коэффициентов аккомодации для листовного опада и воды

	Вода	Листья березы	Вода	Листья липы	Вода	Листья тополя
Т, К	333					
$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	9,042		8,138		8,687	
$A \cdot 10^6$	3,946	3,980	3,529	4,553	3,782	4,803

Из таблицы 4.6 видно, что при одинаковой скорости испарения коэффициент аккомодации для влагоудаления со свободной поверхности воды в среднем ниже на 14,9%, чем из листовного опада при 60 °С.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что на величину коэффициента аккомодации влияет структура материала, с которого происходит удаление влаги.

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью данного раздела является определение перспективности и успешности НИ. Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих задач, с учетом которых были сформированы его структура и содержание:

- определение практической значимости проекта;
- планирование научно-исследовательской работы;
- составление сметы затрат на НИ.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию процессов удаления влаги из опада лиственных пород деревьев, что является актуальным в настоящее время в связи с общими тенденциями использования альтернативных видов топлива, полученных из растительного сырья в том числе.

Влагоудаление из различных материалов тесно связано с таким процессом как испарение. Так как оно происходит на молекулярном уровне, экономически целесообразно изучение его закономерностей производить численными методами, ведь затраты на создание и использование математических моделей значительно ниже затрат для получения той же информации на реальном объекте. Процесс моделирования не так трудоемок и предполагает меньше временных затрат.

Однако, отсутствие или недостаточное количество известных важных констант и коэффициентов затрудняет проведение численного исследования. При теоретическом анализе процессов испарения важно понимать, какие факторы могут оказаться существенными при определении требуемых параметров. Одним из таких факторов является род и структура поверхности испарения.

Изучение основных характеристик процесса испарения влаги из пористых структур древесины и лиственного опада имеет решающее значение для практической реализации использования этих материалов как биотоплива.

Ценность данной работы для научного сообщества состоит в потенциальной возможности использования результатов для дальнейших численных исследований процессов тепломассопереноса с фазовыми превращениями. Экспериментально полученные константы станут дополнением к эмпирической базе, к которой зачастую обращаются в теплотехнике.

5.1 Цели и результат проекта

Устав научного проекта магистерской работы должен иметь цели и результат проекта. Также ниже приведена информация о заинтересованных сторонах научного исследования.

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты в ходе исполнения или в результате завершения проекта. Информация о заинтересованных сторонах проекта представлена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
НИ ТПУ НОЦ И.Н. Бутакова	Дополнение экспериментальной базы в теории сушки
Ученые, разрабатывающие прогностические математические модели процессов тепло- и массообмена	Расширение эмпирической базы, получение констант, характеризующих фазовые переходы
Отечественные компании, планирующие использовать биомассу в качестве энергетического топлива	Обоснования для выбора оптимальных режимов сушки биомассы

В таблице 5.2 представлена информация об иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Таблица 5.2 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Исследовать влияние породы лиственных деревьев на основные характеристики процесса влагоудаления из их опада
Ожидаемые результаты проекта:	Получить экспериментальные значения массовой скорости испарения, парциального давления паров, коэффициента аккомодации, а также выяснить влияние структуры материала на коэффициент аккомодации
Критерии приемки результата проекта:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Уменьшение временных и энергетических затрат на термическую подготовку биомассы; 2. Уменьшение погрешности определения коэффициентов аккомодации относительно известных в научных источниках значений.
Требования к результату проекта:	1. Показать изменение скорости испарения влаги из листьев и веток для трех лиственных пород деревьев при различных температурах в сушильной камере
	2. Показать как зависит коэффициент аккомодации от рода и структуры поверхности испарения

5.2 Организационная структура и план проекта

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществлялось в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования процесса влагоудаления из опада лиственных пород деревьев;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ.

Для выполнения научного исследования сформирована рабочая группа, в состав которой вошел научный руководитель – доцент ТПУ и инженер (магистрант-дипломник). Научный руководитель координирует работу над проектом, контролирует выполнение поставленных задач и консультирует исполнителя. В основные функции инженера входит подготовка образцов к

исследованию; непосредственное проведение экспериментов; выполнение расчетов; анализ и обобщение полученных результатов.

По каждому виду запланированных работ установлены трудовые затраты (трудоемкость) соответствующих исполнителей (табл. 5.3).

Таблица 5.3 – Календарный план проекта в рабочих днях

Вид работ	Дата начала работ	Дата окончания работ	Исполнитель	Продолжительность, дн.
Составление технического задания	24.01.20	24.01.20	Руководитель	1
Подбор и изучение материалов по теме	25.01.20	07.02.20	Инженер	14
Выбор направления исследований	08.02.20	10.02.20	Руководитель	3
			Инженер	3
Календарное планирование работ по теме	11.02.20	11.02.20	Руководитель	1
			Инженер	1
Составление аналитического обзора литературных источников по теме	12.02.20	03.03.20	Инженер	21
Подготовка оборудования и образцов	04.03.20	08.03.20	Инженер	5
Проведение экспериментов	09.03.20	27.04.20	Инженер	50
Обработка результатов и получение графических зависимостей	28.04.20	09.05.20	Инженер	12
Оценка и обсуждение полученных результатов, формулирование основных выводов	10.05.20	12.05.20	Руководитель	3
			Инженер	3
Оформление работы, составление пояснительной записки	13.05.20	26.05.20	Инженер	14
Проверка пояснительной записки	27.05.20	28.05.20	Инженер	2
	29.05.20	30.05.20	Руководитель	2
Итого:			Руководитель	10
			Инженер	125

Далее для иллюстрации календарного плана проекта представлена диаграмма Ганта (табл. 5.4) с разбивкой по месяцам и декадам за весь период времени выполнения научного проекта.

Таблица 5.4 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

Вид работ	Исполнители	Т _к , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ														
			ян-варь	февраль			март			апрель			май				
				3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Составление технического задания	Рук-ль	1	■														
Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	14	▨	▨													
Выбор направления исследований	Рук-ль, инженер	3		■	▨												
Календарное планирование работ по теме	Рук-ль, инженер	1			■												
Составление аналитического обзора литературных источников по теме	Инженер	21			▨	▨											
Подготовка оборудования и образцов	Инженер	5					▨										
Проведение экспериментов	Инженер	50						▨	▨	▨	▨	▨					
Обработка результатов и получение графических зависимостей	Инженер	12											▨				
Оценка и обсуждение полученных результатов, формулирование основных выводов	Рук-ль, инженер	3												■	▨		
Оформление работы, составление пояснительной записки	Инженер	14													▨		
Проверка пояснительной записки	Рук-ль, инженер	4													▨		

■ – научный руководитель ▨ – инженер (дипломник)

5.3 Смета затрат на научное исследование

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета научного исследования использована следующая группировка затрат по статьям

$$K_{\text{проект}} = K_{\text{мат}} + K_{\text{ам}} + K_{\text{фот}} + K_{\text{пр}} + K_{\text{накл}}, \text{ руб.}, \quad (27)$$

где $K_{\text{мат}}$ – материальные затраты НИ, руб.;

$K_{\text{ам}}$ – амортизация оборудования, руб.;

$K_{\text{зп}}$ – издержки на труд для НИ, руб.;

$K_{\text{пр}}$ – прочие прямые затраты, руб.;

$K_{\text{накл}}$ – накладные расходы, руб.

5.3.1 Расчет материальных затрат на научное исследование

Под материальными затратами понимается величина денежных средств, которые были потрачены на канцелярские товары (ручка, простой карандаш, ластик и бумага). Принимаем эти затраты в размере: $K_{\text{мат}} = 500$ руб.

5.3.2 Расчет амортизационных отчислений

Амортизация оборудования подразумевает под собой процесс переноса стоимости оборудования путем начисления амортизационных отчислений.

В процессе проведения научного исследования в качестве основного оборудования использованы ноутбук, сушильный шкаф и лабораторные весы.

Сумма амортизационных отчислений определяется по формуле

$$K_{\text{ам}} = \frac{T_{\text{экспл}}}{T_{\text{кал}}} \cdot C_{\text{об}} \cdot \frac{1}{T_{\text{сл}}}, \text{ руб.}, \quad (28)$$

где $T_{\text{экспл}}$ – время эксплуатации оборудования, дн.;

$T_{\text{кал}} = 365$ дн. – календарное время;

$C_{\text{об}}$ – цена оборудования, руб.;

$T_{\text{сл}}$ – срок службы оборудования, лет.

В таблице 5.5 представлен расчет амортизации оборудования, необходимого на время проекта.

Таблица 5.5 – Расчет амортизационных отчислений

Наименование оборудования	Ц _{об} , руб.	T _{экспл} , дней	T _{сл} , лет	Амортизационные отчисления, руб.
Ноутбук Lenovo Legion Y530-15ICH	68800	117	5	4410,74
Сушильный шкаф СНОЛ-3,5.3,5.3,5/3-M2Y42	50000	50	10	684,93
Весы ACZET (CITIZEN) CY-1003	80460	50	5	2204,38
Итого (K _{ам}):				7300,05

5.3.3 Издержки на труд исполнителей

В настоящую статью включается заработная плата научных и инженерно-технических работников, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда.

Также в данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования, пенсионного фонда и медицинского страхования от затрат на оплату труда работников.

Основная заработная плата руководителя (инженера) рассчитывается как

$$ЗП_{\text{осн}} = ЗП_{\text{дн}} \cdot T_p, \text{ руб.}, \quad (29)$$

где T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (из табл. 5.2);

$ЗП_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата определяется как

$$ЗП_{\text{дн}} = ЗП_{\text{м}} \cdot M / F_d, \text{ руб.}, \quad (30)$$

где $ЗП_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года (при отпуске в 48 раб. дней $M=10,4$ месяца, 6-дневная неделя);

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (табл. 5.6).

Таблица 5.6 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	366	366
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52	52
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	48
- невыходы по болезни	-	-
Действительный годовой фонд рабочего времени F_d	252	252

Расчет основной заработной платы сведен в таблицу 5.7.

Таблица 5.7 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$ЗП_m$, руб.	$ЗП_{дн}$, руб.	T_p , дн.	$ЗП_{осн}$, руб.
Руководитель	38000	1568,25	10	15682,50
Инженер	17000	701,59	125	87698,75

В дополнительную заработную плату научно-производственного персонала включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т. п.

Дополнительная заработная плата, $ЗП_{доп}$, рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении темы. Примем размер доплаты – 10%.

Начисленная заработная плата исполнителям рассчитывается как

$$ЗП = (ЗП_{осн} + ЗП_{доп}) \cdot k_p, \text{ руб.}, \quad (31)$$

где k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Социальные отчисления во внебюджетные фонды определяются как

$$K_{с.о} = k_{внеб} \cdot \Sigma ЗП, \text{ руб.}, \quad (32)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды. В соответствии с п. 2 ст. 425 НК РФ размер страховых взносов составляет 30,2%;

$\Sigma ЗП$ – сумма начисленной зарплаты руководителя и инженера, руб.

Издержки на труд для НИ (фонд оплаты труда) составляет

$$K_{\text{фот}} = \Sigma \text{ЗП} + K_{\text{с.о}}, \text{ руб.} \quad (33)$$

В таблице 5.8 приведен итоговый расчет фонда оплаты труда проекта.

Таблица 5.8 – Заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	Руководитель	Инженер
Основная зарплата (ЗП _{осн}), руб.	15682,50	87698,75
Дополнительная зарплата (ЗП _{доп}), руб.	1568,25	8769,88
Начисленная зарплата (ЗП), руб.	22425,98	125409,22
Сумма начисленных зарплат исполнителей (ΣЗП), руб.	147835,20	
Социальные отчисления (K _{с.о}), руб.	44646,23	
Итого по статье (K _{фот}), руб.	192481,43	

5.3.4 Прочие прямые затраты

В этих расходах определены затраты на электроэнергию, потребляемую оборудованием

$$K_{\text{пр}} = N \cdot T_{\text{исп}} \cdot C_{\text{ээ}}, \quad (34)$$

где N – мощность оборудования по паспорту, кВт;

T_{исп} – время использования оборудования, ч;

C_{ээ} – тариф на электроэнергию для организаций, руб./кВт·ч.

Для ТПУ стоимость 1 кВт·ч электроэнергии составляет 5,8 руб.

В таблице 5.9 приведен расчет стоимости электроэнергии (ЭЭ), затраченной оборудованием в ходе проведения исследования.

Таблица 5.9 – Затраты на электроэнергию

Наименование оборудования	Мощность, кВт	Время использования, ч	Потребление ЭЭ, кВт·ч	Затраты на ЭЭ, руб.
Ноутбук	0,135	117·8=936	126,36	732,89
Сушильный шкаф	2,4	50·8=400	960	5568,0
Весы	0,066	50·8=400	26,4	153,12
Терморегулятор	0,005	50·8=400	2	11,60
Итого (K _{пр}):			1114,76	6465,61

5.3.5 Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную

тому. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов.

Накладные расходы составляют 80-100% от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы.

Величину накладных расходов примем в размере 100% от Σ ЗП

$$K_{\text{накл}} = 1 \cdot \Sigma\text{ЗП} = 147835,20 \text{ руб.}$$

Все полученные результаты по статьям затрат сведем в таблицу 5.10.

Таблица 5.10 – Полная смета затрат на проведение НИ

Элементы затрат	Стоимость, руб.
Материальные затраты	500
Амортизация	7300,05
Издержки на труд для НИ	192481,43
Прочие прямые затраты	6465,61
Накладные расходы	147835,2
Итого ($K_{\text{проект}}$):	354582,29

Таким образом, стоимость научного исследования в рамках ТПУ составила 354582,29 руб.

6 Социальная ответственность

Введение

В работе представлены результаты экспериментальных исследований процессов тепло-и массообмена в период термической подготовки древесной и лиственной биомассы к сжиганию в топках паровых и водогрейных котлов.

Экстенсивный рост потребления угля (в основном в качестве топлива для тепловых электростанций) с середины XIX века привел к насыщению атмосферы планеты продуктами его сгорания (CO_2 , SO , NO), что значительно ускорило процесс глобального потепления. Это создает предпосылки для активного внедрения новых экологически чистых видов топлива на основе биомассы в производство тепла и электроэнергии. В настоящее время биомасса является наиболее перспективным, относительно дешевым и, самое главное, экологически чистым возобновляемым источником энергии.

Предварительная сушка биотоплива на подготовительном этапе к сжиганию связана с дополнительными энергозатратами на испарение адсорбционной влаги древесины и ее удаление во внешнюю среду. Скорость испарения является важной характеристикой при выборе оптимальных режимов работы оборудования и параметров теплоносителя. Таким образом, исследование процесса испарения влаги из пористых структур древесины и лиственного опада имеет решающее значение при использовании этих материалов в качестве биотоплива.

Для научного сообщества ценность данной работы состоит в возможности использования результатов для других численных исследований процессов тепломассопереноса с фазовыми превращениями.

Рабочая зона в данном исследовании представляет собой аудиторию для проведения экспериментов, оборудованную рабочим столом, стулом со спинкой, ПК, сушильным шкафом, лабораторными весами, металлической тумбой для размещения на ней нагретых образцов.

6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Среди законодательных актов по обеспечению безопасности основное значение имеет Конституция РФ, Трудовой Кодекс РФ от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018), устанавливающие основные правовые гарантии работникам, а также Федеральный закон от 24.07.1998 № 125-ФЗ (ред. от 27.12.2019) «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний».

Эргономические требования по организации рабочих мест с учетом специфики трудовой функции, выполняемой работниками, закрепленные национальными стандартами РФ (ГОСТ) и санитарными правилами и нормами (СанПиН), направлены на создание комфортной рабочей среды.

6.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства

В ст. 91 ТК РФ вводится понятие рабочее время – время, в течение которого работник в соответствии с правилами внутреннего трудового распорядка и условиями трудового договора должен исполнять трудовые обязанности. Нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю.

В соответствии со ст. 100 ТК РФ режим рабочего времени должен предусматривать продолжительность рабочей недели. Для студентов и преподавателей НИ ТПУ согласно правилам внутреннего трудового распорядка предусмотрена шестидневная с одним выходным днем.

Главой 14 ТК РФ гарантирована защита персональных данных работника. Работники и их представители должны быть ознакомлены под роспись с документами работодателя, устанавливающими порядок обработки персональных данных работников, а также об их правах и обязанностях в этой области.

Согласно приказу ректора НИ ТПУ 22.08.2019 №61-од утверждено приложение 3б к Положению «Об обработке и защите персональных данных в

Томском политехническом университете» в новой редакции, в котором ТПУ гарантирует обучающемуся по образовательной программе высшего образования, обработку личных данных в соответствии с законодательством РФ.

6.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Основным объектом в производственных условиях является рабочее место, представляющее собой в общем случае пространство, в котором может находиться человек при выполнении производственного процесса. Организация рабочего места – это система мероприятий по его оснащению средствами и предметами труда и размещению их в определенном порядке с учетом санитарно-гигиенических требований. Необходимыми требованиями являются обеспечение условий для безопасного ведения работ, соблюдение норм и правил техники безопасности.

Общие эргономические требования к рабочему месту исследователя при работе сидя должны соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78:

- конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов (сиденье, органы управления, средства отображения информации и т. д.) должны соответствовать антропометрическим, физиологическим и психологическим требованиям, а также характеру работы;

- конструкцией рабочего места должно быть обеспечено выполнение трудовых операций в пределах зоны досягаемости моторного поля;

- конструкцией рабочего места должно быть обеспечено оптимальное положение работающего, которое достигается регулированием: высоты рабочей поверхности, сиденья и пространства для ног.

Для просмотра и обработки экспериментальных значений при исследовании процесса влагоудаления рабочее место было оборудовано персональным компьютером. Для создания комфортной рабочей среды рабочее место пользователя ПК должно быть организовано в соответствии с главой VI, IX, X «Гигиенических требований к персональным электронно-вычислительным

машинам и организации работы» (СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03), «Типовой инструкцией по охране труда при работе на персональном компьютере» (ТОИ Р-45-084-01):

- рабочие столы следует размещать таким образом, чтобы видеодисплейные терминалы были ориентированы боковой стороной к световым проемам, чтобы естественный свет падал преимущественно слева;

- в качестве источников искусственного освещения следует использовать люминесцентные лампы типа ЛБ и компактные люминесцентные лампы (КЛЛ). При периметральном расположении компьютеров линии светильников должны располагаться локализовано над рабочим столом ближе к его переднему краю, обращенному к оператору;

- конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей, характера выполняемой работы;

- высота рабочей поверхности стола для взрослых пользователей должна регулироваться в пределах 680-800 мм;

- пространство для ног должно отвечать следующим требованиям: высота – не менее 600 мм, ширина – не менее 500 мм, глубина – не менее 450 мм;

- рабочий стул (кресло) должен быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию;

- монитор, корпус компьютера и клавиатура должны находиться прямо перед оператором;

- экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600-700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов;

- клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края, обращенного к пользователю, или на специальной,

регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы.

6.2 Производственная безопасность

Проведем анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникать в лаборатории при проведении исследований процесса влагоудаления из опада лиственных пород деревьев. Для идентификации потенциальных факторов использован ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация». Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды представлен в виде таблицы 6.1.

Таблица 6.1 – Опасные и вредные производственные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работы			Нормативные документы
	разработка	изготов- ление	эксплуа- тация	
Отклонение показателей микроклимата	+			СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны
Превышение уровня шума	+			ГОСТ 12.1.003-14 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности СН2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки
Отсутствие или недостаток естественного света	+			СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение.
Недостаток освещенности рабочей зоны	+			Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий
Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может пройти через тело человека	+			ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов

Повышенный уровень электромагнитных излучений	+			СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работ
Повышенная температура поверхностей оборудования, образцов	+			ГОСТ Р 51337-99. Безопасность машин. Температуры касаемых поверхностей. Эргономические данные для установления предельных величин горячих поверхностей
Нервно-психические перегрузки	+			СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы

6.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Рассмотрим выявленные вредные и опасные факторы: их воздействие на исследователя и допустимые нормы воздействия на организм человека.

1. Отклонение показателей микроклимата

Микроклимат помещений создается искусственно с целью обеспечения благоприятных условий для людей. Микроклимат в рабочей зоне определяется действующим на организм человека сочетанием температуры, влажности и скорости движения воздуха, а также температурой окружающих поверхностей.

В лаборатории при проведении исследований процесса влагоудаления из опада лиственных пород деревьев необходим прогрев камеры до заданной температуры, что может привести к повышению температуры воздуха в помещении. Работа персонального компьютера во время обработки экспериментальных значений способствует понижению влажности воздуха.

При отклонении фактических параметров микроклимата от нормативных происходит нарушение теплообмена, терморегуляции. Накопление тепла в организме приводит к нарушению и расстройству нервной системы, секреторной деятельности желудка, печени, нарушению обменных процессов.

Состояние микроклимата в рабочем помещении должно соответствовать СанПиН 2.2.4.548-96. Работа в лаборатории, как правило, производится сидя, редко стоя и не связана с ходьбой, не требует систематического физического

напряжения или поднятия и переноски тяжестей. Ее можно отнести к категории работ 1а – работа с интенсивностью энергозатрат до 120 ккал/ч (до 139 Вт). Помещение характеризуется незначительными избытками явного тепла. Допустимые нормы для данной категории работ сведены в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 – Допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне производственных помещений

Сезон года	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	22-24,0	21,0-25,0	60-40	≤0,1
Теплый	23-25,0	22,0-26,0	60-40	≤0,1

2. Превышение уровня шума

Шум – совокупность звуков различной частоты и интенсивности, беспорядочно изменяющихся во времени. Физической природой шума являются механические колебания в среде. При проведении экспериментальной части исследования основным источником шума является работающая сушильная камера и вытяжная вентиляция.

Шум оказывает как местное, так и общее воздействие на организм. Он может стать причиной учащенного пульса, повышенного артериального давления, головных болей, бессонницы, ослабления внимания, замедления психических реакций. Шум не только ухудшает самочувствие человека, снижает производительность труда в среднем на 10-15%, но и очень часто приводит к профессиональным заболеваниям, таким как тугоухость.

Нормирование допустимых уровней звукового давления производится в соответствии с ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ. Эквивалентный уровень звука при измерительных работах в лаборатории не должен превышать 60 дБА.

Для минимизации воздействия данного фактора в качестве средств индивидуальной защиты (СИЗ) от шума можно использовать беруши, наушники.

3. Отсутствие или недостаток естественного света, недостаток освещенности рабочей зоны

Естественное освещение обусловлено прямыми солнечными лучами и рассеянным светом небосвода. Меняется в зависимости от географической широты, времени суток, степени облачности, прозрачности атмосферы.

Из-за неправильного освещения образуются глубокие и резкие тени и другие неблагоприятные факторы, зрение быстро утомляется, что приводит к дискомфорту, снижению концентрации, появлению симптомов усталости.

Согласно санитарно-гигиеническим требованиям в лабораториях высших учебных заведений предусматривается естественное, искусственное и совмещенное освещение. При работе за персональным компьютером и работе с необходимой документацией минимальная искусственная освещенность рабочего места должна составлять 200 лк. В данных условиях разряд зрительной работы – 4г (работа средней точности). К освещению рабочих мест, оборудованных персональным компьютером, применяются следующие требования (табл. 6.3).

Таблица 6.3 – Требования к освещению рабочего места, оборудованного ПК

Параметр	Значение параметра
Освещенность на рабочем столе, лк	300-500
Освещённость на экране, лк	не выше 300
Блики на экране, кд/м ²	не выше 40
Прямая блёскость источника света, кд/м ²	200
Показатель ослеплённости	не более 20
Показатель дискомфорта	не более 15
Отношение яркости между рабочими поверхностями	3:1-5:1
Отношение яркости между поверхностями стен и оборудования	10:1
Коэффициент пульсации, %	не более 5

Для смягчения теней, образующихся при неправильном освещении, рекомендуется использовать светильники со светорассеивающими молочными стеклами, а при естественном освещении использовать солнцезащитные устройства (жалюзи, козырьки и т. д.).

Помещение лаборатории оснащено рабочим и аварийным освещением согласно требованиям СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03, а естественное освещение организовано через оконный проем размером 1,3×2,8h.

Выполним расчет общего равномерного искусственного освещения по методу светового потока для прямоугольного помещения лаборатории длиной $A = 3,21$ м, шириной $B = 2$ м, высотой $H = 4$ м. Необходимо создать освещенность

$E_H = 300$ лк. Согласно отраслевым нормам освещенности уровень рабочей поверхности над полом составляет $h_{рп} = 0,8$ м.

Световой поток ламп светильника определяется по формуле

$$\Phi = E_H \cdot S \cdot K_3 \cdot Z \cdot 100 / (n \cdot \eta), \text{ лм}, \quad (35)$$

где: E_H – нормируемая минимальная освещённость по СНиП 23-05-95, лк;

S – площадь освещаемого помещения, м²;

K_3 – коэффициент запаса, учитывающий старение ламп и загрязнение светильников, при малом выделении пыли $K_3 = 1,5$;

Z – коэффициент неравномерности освещения. Для люминесцентных ламп при расчётах составляет $Z = 1,1$;

n – число ламп в помещении;

η – коэффициент использования светового потока, %.

Так как поверхность стен окрашена в серый цвет, свежепобеленные с окнами без штор, то коэффициент отражения поверхности стен $\rho_{ст} = 50\%$. Поверхность потолка также свежепобеленная, поэтому коэффициент отражения поверхности потолка $\rho_{п} = 70\%$ [71, табл. 10].

Выбираем светильник типа ОД-2-80 с количеством ламп $N = 2$ шт.

Высота светильника над рабочей поверхностью

$$h = H - h_{рп} = 4 - 0,8 = 3,2 \text{ м.}$$

Индекс помещения

$$i = S / (h \cdot (A + B)) = (3,21 \cdot 2) / (3,2 \cdot (3,21 + 2)) = 0,39.$$

Учитывая $\rho_{ст}$, $\rho_{п}$ и i , определяем значение коэффициента использования светового потока по [71, табл. 11]: $\eta = 31\%$.

Потребный световой поток ламп (35)

$$\Phi = 300 \cdot 6,42 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 100 / (2 \cdot 31) = 5126 \text{ лм.}$$

По [71, табл. 1] выбираем ближайшую стандартную лампу – ЛБ-80 с потоком 5200 лм. Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq [(\Phi_{л.станд} - \Phi_{л.расч}) / \Phi_{л.станд}] \cdot 100\% \leq +20\%,$$

$$-10\% \leq [(5200 - 5126) / 5200] \cdot 100\% \leq +20\%,$$

$$-10\% \leq 1,42\% \leq +20\%.$$

Световой поток лампы не выходит за пределы диапазона ($-10\% \div +20\%$), поэтому нет необходимости далее корректировать число светильников и ламп.

4. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может пройти через тело человека

Поражение электрическим током может произойти при прикосновении к токоведущим частям, находящимся под напряжением, на которых остался заряд или появилось напряжение в результате случайного включения в сеть; к нетоковедущим частям, выполненным из проводящего электрический ток материала, после перехода на них напряжения с токоведущих частей.

В лаборатории источником поражения электрическим током являются провода с поврежденной изоляцией, неисправные рубильники, штепсельные вилки, розетки, а также заземление.

Электрический ток оказывает на человека термическое, электролитическое, биологическое и механическое воздействие. Термическое воздействие тока проявляется ожогами отдельных участков тела, нагревом до высокой температуры органов, что вызывает в них значительные функциональные расстройства. Электролитическое воздействие в разложении различных жидкостей организма (воды, крови, лимфы) на ионы, в результате чего происходит нарушение их физико-химического состава и свойств. Биологическое действие тока проявляется в виде раздражения и возбуждения тканей организма, судорожного сокращения мышц, а также нарушения внутренних биологических процессов.

Опасность поражения человека электрическим током оценивается величиной тока, проходящего через его тело, или напряжением прикосновения. Предельно допустимые напряжения прикосновения и токи для человека устанавливаются ГОСТ 12.1.038-82 при аварийном режиме работы электроустановок постоянного тока частотой 50 и 400 Гц. Для переменного тока частотой 50 Гц допустимое значение напряжения прикосновения составляет 2 В, а силы тока – 0,3 мА; для тока частотой 400 Гц соответственно – 2 В и 0,4 мА;

для постоянного тока – 8 В и 1 мА. Указание данные приведены для продолжительности воздействия тока не более 10 мин в сутки.

Согласно ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация, существуют следующие виды защиты от повышенного значения напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека: изолирующие устройства и покрытия; устройства защитного заземления и зануления; устройства автоматического отключения; предохранительные устройства; знаки безопасности.

5. Повышенный уровень электромагнитных излучений

Главным источником электромагнитного поля в лаборатории, воздействующего на исследователя, является персональный компьютер, а также электропроводка. Электромагнитное поле своим воздействием может быть причиной учащенного пульса, дыхания, повышения артериального давления, возникновения головных болей, ослабления внимания и замедления реакции, что приводит к снижению работоспособности.

Электромагнитное поле, создаваемое ПК, имеет сложный спектральный состав в диапазоне частот от 0 Гц до 1000 МГц. Временные допустимые уровни электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых ПК нормируются СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 (табл. 6.4).

Таблица 6.4 – Временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ

Наименование параметра		ВДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц-400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц-400 кГц	25 нТл
Электростатический потенциал экрана видеомонитора		500 В

Для уменьшения степени воздействия электромагнитных излучений от ПК необходимо делать перерывы в работе – по 15 минут каждые 2 часа.

6. Повышенная температура поверхностей оборудования, образцов

Нагревательные панели в сушильной камере разогреваются до температур порядка 120 °С. Горячие поверхности, доступные оператору, являются причиной риска ожогов. Прикосновение к горячей поверхности может

быть преднамеренным, например, при извлечении образца для контроля потери массы, или непреднамеренным.

Для оценки риска ожога от горячей поверхности необходимо знать факторы, ведущие к ожогу при соприкосновении кожи с горячей поверхностью. Главные факторы: температура поверхности; материал поверхности; продолжительность контакта кожи с поверхностью. Согласно ГОСТ Р 51337-99 при продолжительности контакта от 1 до 10 с для металла с покрытием (нагревательные панели, лабораторная посуда) ожоговый порог – 48 °С.

Чтобы избежать вероятности получения ожогов в качестве СИЗ используются хлопчатобумажные перчатки.

7. Нервно-психические перегрузки

В результате длительного непрерывного интеллектуального труда и монотонности процесса у исследователя могут возникнуть нервно-психические перегрузки, такие как перенапряжение анализаторов, в том числе вызванное информационной нагрузкой, умственное перенапряжение, эмоциональные перегрузки. Нервно-эмоциональное напряжение может быть вызвано ответственностью за выполняемую работу, сложностью или необычностью работы, особенно в условиях дефицита времени.

Основным симптомом является чувство постоянной усталости и разбитости. При этом может отмечаться раздражительность, когда любая мелочь способна вывести из состояния душевного равновесия. Перенапряжение зрительных анализаторов может привести к утомлению и как следствие к нарушению сократительной функции глазных мышц. Нервно-эмоциональное напряжение может нарушить функциональное состояние сердечно-сосудистой и центральной нервной системы (повышение артериального давления, изменение латентного периода двигательной реакции).

Лимитирующим показателем для психофизиологических перегрузок является уровень нагрузки.

Организация режимов труда и отдыха при работе с ПК должна соответствовать СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к

персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы». Согласно этому документу, для 8-часовой смены при третьей категории работ с ПК (до 6 часов в течение смены) и уровне нагрузки за рабочую смену при работе с ПК для группы В, предполагающей творческую работу в режиме диалога с ПК (включающую как считывание информации, так и ее ввод) устанавливается суммарное время регламентированных перерывов – 90 мин.

6.2.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя (работающего)

Рассмотрим решения, обеспечивающие снижение влияния выявленных опасных и вредных факторов на исследователя, а также требования безопасности, предъявляемые к работам, выполняемым в лаборатории, установкам и устройствам, формирующим опасные факторы.

1. Нормализация показателей микроклимата

Наиболее распространенными способами нормализации микроклимата являются рациональная вентиляция, отопление и кондиционирование воздуха.

В данной лаборатории действуют естественная неорганизованная общеобменная вентиляция и водяное отопление, которые позволяют поддерживать микроклиматические условия, соответствующую нормам.

Количество приточного воздуха при естественном проветривании должно быть не менее 30 м³/ч на одного человека, что соблюдается не всегда, так как для проведения экспериментов необходимо постоянство подвижности воздуха в помещении (при открытии дверцы сушильной камеры при загрузке образцов) для чистоты результатов. Поэтому проветривание производится исключительно в перерывах между опытами.

Для создания нормальных условий труда необходимо обеспечить не только комфортные метеорологические условия, но и необходимую чистоту воздуха. Допустимые нормы по запыленности должны соответствовать

санитарным нормам для ПДК веществ 4-ого класса опасности по ГН 2.2.5.1313-03 и поддерживаются вентиляцией и влажной ежедневной уборкой в помещении.

2. Уменьшение уровня шума

Для снижения шума в производственных помещениях применяют различные методы: уменьшение уровня шума в источнике его возникновения; звукопоглощение и звукоизоляция; установка глушителей шума; рациональное размещение оборудования; применение средств индивидуальной защиты.

Для снижения данного вредного фактора на нагнетательном патрубке вытяжной вентиляции установлены глушители шума. Стеклопакет, смонтированный в оконном проеме, поглощает некоторое количество шума, поступающий в лабораторию с улицы.

Для уменьшения уровня шума от сушильной камеры необходимо звукоизолировать ее особо шумную часть – заднюю стенку.

3. Организация освещенности рабочей зоны

К средствам нормализации освещенности рабочих мест относятся: источники света, осветительные приборы, световые проемы, светозащитные устройства. В качестве осветительных приборов в лаборатории установлены люминесцентные лампы типа ЛБ.

При организации освещения в лаборатории необходимо:

- обеспечить равномерное распределение яркости на рабочей поверхности и окружающих предметах;
- для улучшения видимости объектов в поле зрения работающего исключить прямую и отраженную блесткость. С этой целью, по возможности, блестящие поверхности следует заменять матовыми;
- при наличии зон с недостаточным искусственным освещением и достаточным уровнем естественного освещения изменять размещение рабочих мест с их переносом в зону с достаточным уровнем естественного освещения;
- выполнять косметический ремонт помещения с применением светлых отделочных материалов.

4. Снижение вероятности влияния повышенного напряжения в электрической цепи, замыкание которой может пройти через тело человека

В соответствии с «Правилами устройства электроустановок» помещение лаборатории по опасности поражения электрическим током относится к третьей группе – помещение без повышенной опасности, так как в нем отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность (повышенная влажность, запыленность, токопроводящие полы и т. п.).

При проведении исследования используется следующее электрооборудование: сушильный шкаф и персональный компьютер.

Требования к сушильному шкафу по электробезопасности: перед началом эксплуатации лабораторные сушильные шкафы заземляются, для этой цели не допускается использование газовых, канализационных и водопроводных сетей; запрещается помещать в шкаф воспламеняющиеся и горючие материалы, а также те, которые в жидком состоянии могут залить нагревательные элементы; во время работы необходимо следить за тем, чтобы кабель электропитания не соприкасался с нагретыми элементами шкафа; при длительном перерыве в работе со шкафом необходимо вилку отсоединить от розетки; при нарушении нормальной работы шкафа необходимо выключить его, отсоединить от питающей сети и принять меры к устранению неисправностей; ремонтные работы вести только после полного снятия напряжения.

Особые требования предъявляются к обеспечению электробезопасности пользователей, работающих на персональных компьютерах. К их числу относятся следующие: все узлы одного ПК и подключенное к нему периферийное оборудование должны питаться от одной фазы электросети; корпуса системного блока и внешних устройств должны быть заземлены радиально с одной общей точкой; для отключения компьютерного оборудования должен использоваться отдельный щит; все соединения ПК и внешнего оборудования должны производиться при отключённом электропитании.

Помещение лаборатории должны соответствовать требованиям электробезопасности при работе с электроустановками по ГОСТ 12.1.019-79. По

способу защиты человека от поражения током оборудование лаборатории относится к I классу электрических изделий, т.е. все оборудование имеет защитную изоляцию, заземление – согласно ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Отключение всей сети, за исключением дежурного освещения, производится общим рубильником.

В целях предотвращения электротравматизма в лаборатории запрещается: работать на неисправных электрических приборах и установках; перегружать электросеть; работать вблизи открытых частей электроустановок, прикасаться к ним; загромождать подходы к электрическим устройствам.

Обо всех обнаруженных дефектах в изоляции проводов, неисправности рубильников, штепсельных вилок, розеток, а также заземления следует немедленно сообщить руководителю. При перерыве в подаче электроэнергии электроприборы должны быть немедленно выключены. Категорически запрещается прикасаться к корпусу поврежденного прибора или токоведущим частям с нарушенной изоляцией и одновременно к заземленному оборудованию (другой прибор с исправным заземлением, водопроводные трубы, отопительные батареи), либо прикасаться к поврежденному прибору, стоя на влажном полу.

Помещение лаборатории должно быть оборудовано предупредительной сигнализацией и блокировкой, а также в наличии должны быть знаки безопасности и предупреждающие плакаты. Рабочее место у сушильного шкафа должно быть снабжено резиновым ковриком и диэлектрическими перчатками.

5. Снижение уровня электромагнитных излучений

В качестве основных способов защиты от негативного воздействия электромагнитного поля могут служить:

- экранирование (активное и пассивное: источника электромагнитного излучения или же объекта защиты; комплексное экранирование);
- при организации системы электропитания в выбранном для установки компьютерной техники помещении, недостаточно выполнить общепринятые правила электробезопасности, если в этом помещении установлены другие электроустройства со значительным энергопотреблением. Разводка

электропитания должна быть выполнена таким образом, чтобы обеспечивалась нейтрализация магнитных полей, создаваемых этими устройствами;

– рациональное размещение компьютерной техники на рабочих местах с соблюдением основного принципа – наибольшей удаленности от пользователей ПЭВМ и других окружающих основных источников электростатических и электромагнитных полей (дисплея, системного блока, элементов сетевого питания и т.п.);

– использование конструктивно усовершенствованного оборудования с пониженным уровнем ЭМП и в обязательном порядке – с гигиеническими сертификатами, подтверждающими соответствие данной техники гигиеническим требованиям СанПиН 3.3.2.007-98;

– ограничение времени пребывания исследователя в зоне действия ЭМП.

6. Снижение температуры поверхностей оборудования, образцов

Все работы с сушильным шкафом должны проводиться в условиях, исключающих возможность воздействия на человека высоких температур.

Во избежание термических ожогов необходимо при открывании дверцы печи стоять со стороны, противоположной направлению открытия. Открывать печь и вынимать образцы можно только в защитных очках и хлопчатобумажных перчатках.

Около печи должна располагаться металлическая поверхность для размещения на ней нагретых образцов и дальнейшего их остывания.

7. Снижение нервно-психических перегрузок

Меры по снижению нервно-психических перегрузок на рабочем месте, приведенные в методических рекомендациях МР 2.2.9.2311-07 «Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности», предусматривают внедрение рациональных режимов труда и отдыха, комплекса оздоровительно-профилактических мероприятий для предупреждения воздействия стресс-факторов на организм работающих.

При пятидневной рабочей неделе и 8-часовой смене продолжительность обеденного перерыва составляет 30 мин., а регламентированные перерывы

рекомендуется устанавливать через 2 ч. от начала рабочей смены и через 2 ч. после обеденного перерыва продолжительностью 5-7 мин. каждый.

Для предупреждения преждевременной утомляемости пользователей ПК рекомендуется организовывать рабочую смену путем чередования работ с использованием ПК и без него, непрерывная работа не должна превышать 1 ч.

Во время регламентированных перерывов с целью снижения нервно-эмоционального напряжения, утомления зрительного анализатора, устранения влияния гиподинамии и гипокинезии, а также предотвращения развития позотонического утомления целесообразно выполнять комплексы физических упражнений, включая упражнения для глаз.

6.3 Экологическая безопасность

Исследование процесса влагоудаления, проводимое в лаборатории, не оказывает негативного влияния на атмосферу и гидросферу, так как при проведении эксперимента выбросов и сбросов загрязняющих веществ нет.

В процессе выполнения работ в лаборатории образуются следующие виды отходов:

- лампы ртутные, утратившие потребительские свойства;
- отходы бумаги и картона от канцелярской деятельности;
- компьютеры и периферийное оборудование, утратившие потребительские свойства;
- мусор от офисных и бытовых помещений организаций несортированный (исключая крупногабаритный).

При обращении с образующимися отходами необходимо осуществлять их отдельный сбор по их видам, классам опасности с тем, чтобы обеспечить их передачу на использование в качестве вторичного сырья, переработку, обезвреживание или последующее размещение.

Хранение отработанных ртутьсодержащих ламп, относящихся к I классу опасности (чрезвычайно опасные отходы) производится в специально выделенном для этой цели помещении, атмосферных осадков, поверхностных и

грунтовых вод, а также в местах, исключающих повреждение тары для хранения. При накоплении (не более 11 месяцев) партии, отходы передаются лицензированной организации для обезвреживания.

Компьютеры и периферийное оборудование, утратившие потребительские свойства, после признания оборудования непригодным к использованию, хранятся в специально отведенное место для временного накопления на стеллажах, навалом, штабелем, в коробках. После формирования партии для сдачи передаются специализированной организации, имеющей соответствующую лицензию на обработку, утилизацию, или обезвреживание.

Мусор от офисных и бытовых помещений организаций несортированный (исключая крупногабаритный) после уборки транспортируются персоналом по уборке в специально отведенные контейнеры для последующего вывоза региональным оператором. ТКО должны храниться в стандартных металлических или пластиковых контейнерах, установленных на площадке с водонепроницаемым покрытием. Периодичность вывоза ТКО определяется потребностью предприятия, но реже 1 раза в неделю.

Сбор отходов бумаги и картона от канцелярской деятельности и делопроизводства производится в каждом подразделении ИШЭ в картонные коробки и для дальнейшего накопления транспортируются сотрудниками в специально отведенное место (склад). После формирования партии, отходы передаются в специализированную организацию согласно договору в качестве вторсырья. Допускается накопление отхода не более 11 месяцев с обеспечением правил пожарной безопасности. Запрещается сжигание данного отхода.

6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

По природе возникновения чрезвычайные ситуации могут быть:

- техногенные (пожары, взрывы, обрушения зданий, выброс радиации);
- природные (землетрясения, ливни, бури, смерчи);
- биологические (эпидемии, эпизоотии, эпифитотии);
- экологические (загрязнение среды, разрушение озонового слоя);

- социальные (терроризм, насилие, войны, бандитизм).

Возникновение пожара является основной и наиболее опасной ЧС на рабочем месте исследователя. Причинами возникновения пожара в лаборатории могут быть: несоблюдение правил эксплуатации электроустановок (сушильной камеры и ПК) и электросети; нарушение режимов работы термонагревающего оборудования; перегрев мест соединений токоведущих частей в результате образования высокого переходного сопротивления; несоблюдение правил пожарной безопасности.

Мероприятия по предотвращению пожара в лаборатории разрабатываются на основании требований ППБ-01-03 и ППБ 101-89:

- организационные: проведение инструктажей, бесед, лекций по пожарной безопасности (ПБ);
- эксплуатационные: постоянный контроль правильности эксплуатации оборудования, аппаратуры, содержание зданий в состоянии ПБ;
- технические: соблюдение противопожарных правил при устройстве отопления, вентиляции, установке аппаратуры, применение в конструкциях приборов и устройств быстродействующих средств отключения возможных источников зажигания;
- режимного: запрещение курения в не установленных местах.

Действия коллектива при возникновении пожара:

- без промедления сообщить по телефону в МЧС (при этом необходимо назвать место возникновения пожара, а также сообщить свою фамилию);
- принять меры по вызову к месту пожара своего руководителя или другого ответственного лица;
- отключить электрооборудование, электрические приборы, компьютеры и электропитание в помещении, где возник пожар;
- покинуть зону воздействия опасных факторов пожара, воздействующих на организм человека, за пределы помещения, в котором возник пожар;
- приступить к ликвидации пожара, используя первичные средства пожаротушения.

Для тушения пожара и воспламенения горючих веществ (ГВ) следует пользоваться: при воспламенении ГВ, смешивающихся с водой – любыми огнетушителями, струей воды, песком, асбестовым или брезентовым покрывалом; при воспламенении ГВ, не смешивающихся с водой – углекислотными или порошковыми огнетушителями, песком.

Сотрудники лаборатории должны быть ознакомлены с планом эвакуации людей и материальных ценностей при пожаре, который должен находиться в помещении и на каждом этаже лестничной клетки.

Выводы по разделу

Полученные результаты раздела «Социальная ответственность» содержат в себе основные рекомендации и указания, которые следует выполнять при реализации экспериментального исследования процесса влагоудаления из опада лиственных деревьев для снижения уровня воздействия вредных факторов, исключения несчастных случаев. Выявлен характер воздействия исследования на окружающую среду и предложены решения по его снижению.

Выявлен наиболее вероятный вид чрезвычайной ситуации, разработаны превентивные меры по предупреждению ее возникновения, а также порядок действия в результате возникновения ЧС и меры по ликвидации её последствий.

Практическая значимость данного раздела состоит в обеспечении эффективной, надежной и безопасной работы исследователя в условиях стабильной и изменяющейся окружающей среды, включая экстремальные ситуации.

Заключение

1. Для листовенного и древесного опада березы, липы и тополя получены экспериментальные сведения о массовых скоростях влагоудаления в диапазоне температур от 333 до 393 К.

2. Проведена оценка погрешностей в соответствии с теорией инженерного эксперимента, определены доверительные интервалы для серии экспериментов.

3. С учётом доверительных интервалов построены и проанализированы экспериментальные зависимости скорости удаления влаги из опада листовенных пород деревьев от времени.

4. Результаты приведены к безразмерному виду, что позволило получить безразмерные кривые скорости влагоудаления, необходимые для решения широкого круга прикладных задач.

5. Выяснено, что временные и соответственно энергетические затраты на сушку веток тополя больше, чем веток берёзы и липы на всем рассматриваемом температурном диапазоне, а для листьев эти затраты наиболее высокие у березы.

6. Определено парциальное давление паров и вычислены значения коэффициента аккомодации для процесса испарения в диапазоне температур от 333 К до 393 К для влагоудаления из опада листовенных пород деревьев.

7. Установлено, что на коэффициент аккомодации влияет структура материала, с которого происходит влагоудаление. Значения коэффициента аккомодации для испарения с поверхности воды при температуре 333 К ниже как для влагоудаления из листьев, так и из древесного опада (веток).

8. Произведена оценка материальных затрат на реализацию научного исследования.

9. Проанализированы вредные и опасные факторы, которые могут возникнуть при проведении исследования.

10. Рассмотрены вопросы экологической безопасности, безопасности при чрезвычайных ситуациях, возникающие при выполнении экспериментальных

исследований по определению характеристик процесса влагоудаления из опада лиственных пород деревьев.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Guo M., Song W., Buhain J. Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – Vol. 42. – P. 712-725.

2 Singlitico, A., Goggins J., Monaghan R. F. D. Evaluation of the potential and geospatial distribution of waste and residues for bio-SNG production: A case study for the Republic of Ireland // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – Vol. 98. – P. 288-301.

3 Фокин С.В. Противопожарные мероприятия при проведении лесокультурных работ / К.С. Золотов, С.В. Фокин // «Технология и природная безопасность ТПБ – 2013»: Материалы II Всероссийской научно-практической конференции. – Саратов, 2013. – С. 65-66.

4 Дубинина Н.Н., Орлов А.А., Корчук Ю.А. Энергетическое использование древесных отходов лесопильного производства // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. – 2016. – №45. – С. 17-21.

5 Кирпичникова И.М., Филь Н.С. Древесные отходы как возобновляемый источник для получения тепловой и электрической энергии // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. – 2012. – №16 (275). – С. 18-21.

6 Хабибуллина А.Р., Саттарова З.Г., Суходова М.Н. Конвективная сушка древесных отходов // *Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений 22-23 сентября 2015 года* – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2015. – С. 300-305.

7 Мясников А.Г. Лесоведение и лесоводство, – Томск: Издательский дом Томского государственного университета, 2017. – 52 с.

8 Неделина Н.Ю. Уровень филогенетического развития гистологического состава и специализации элементов представителей различных типов древесины // *Научный журнал КубГАУ*. – 2013. – №86. – С. 1-12.

9 Неделина Н.Ю. Эффективный способ определения гистологического состава // Научный журнал КубГАУ. – 2012. – №79. – С. 1-13.

10 Швамм Е.Е. Физика древесины – Екатеринбург: ФГБОУ ВПО УЛГТУ, 2015. – 31 с.

11 Уголев Б.В. Древесиноведение с основами лесного товароведения – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2007. – 351 с.

12 Алексеева А.О., Артеменков А.М. Современное состояние техники для измерения влажности // Ландшафтная архитектура, строительство, и обработка древесины: материалы научно-технической конференции СПбГЛТУ по итогам НИР 2017 года ИЛАСИОД Санкт-Петербург, 15-16 февраля 2018 года – СПб: ФГАОУ ВО СПбПУ, 2018. – С. 19-22.

13 Литвишко Е.С., Горешнев М.А. О возможности измерения влажности древесины инфракрасным излучением // Современные техника и технологии: сборник докладов XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Томск, 14-18 апреля 2014 года – Томск: НИИ ТПУ, 2014. – С. 119-120.

14 Чулков А.О., Pradere C, Puiggali J.R., Batsale L.C., Вавилов В.П. Оценка влажности древесины методом терагерцовой инфракрасной термографии // Дефектоскопия. – 2016. – №12. – С. 87-92.

15 Мартынов А.Н., Мельников А.С., Ковязин В.Ф., Аникин А.С., Минаев В.Н., Беляева Н.В. Основы лесного хозяйства и таксация леса – СПб.: ООО Изд-во «Лань», 2008 – 372 с.

16 Онучин Е.М., Анисимов П.Н. История и перспектива технологий и технических средств заготовки и переработки древесины энергетического назначения // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2013. – №37. – С. 136-142.

17 Фокин С.В., Фомина О.А. Об основных видах энергетической древесины // Forest Engineering: материалы научно-практической конференции с международным участием г. Якутск, 30-31 мая 2018 года. – С. 273-275.

18 Залесов С.В. Ресурсы невостребованной древесины для нужд биоэнергетики в лесах уральского федерального округа // Актуальные проблемы развития биотехнологий: сборник материалов международной научно-практической конференции Екатеринбург: Уральское аграрное изд-во, 2013. – С. 70-72.

19 Шарапа С.П. Современные технологии сжигания местных видов топлива в котлах небольшой производительности // Энергия и менеджмент. – 2016. – №1. – С. 29-32.

20 Степанов В.С., Степанова Т.Б., Старикова Н.В. Оценка теплотехнических характеристик древесного топлива // Системы. Методы. Технологии. – 2015 – №1 (25). – С. 117-123.

21 Меньшиков Б.Е., Курдышева Е.В. Ресурсы и основные направления использования древесного сырья для производства тепловой энергии на лесозаготовительных предприятиях // Леса России и хозяйство в них. – 2018. – №1 (64). – С. 59-65.

22 Крылова А.Г., Лавриченко В.А. Экономические аспекты использования древесного топлива в малой энергетике // ECONOMICS. – 2018. – №2 (34). – С. 5-10.

23 Пожарная безопасность. Энциклопедия. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2007. – 416 с.

24 Гусев В.Г., Лопухова Е.Л., Дубовый В.К. Классификация и общие свойства лесных горючих материалов // Известия вузов. Лесной журнал. – 2012. – №1. – С. 134-145.

25 Cohen J.D., Deeming J.E. The National Fire-Danger Rating System: basic equations // Gen. Tech. Rep. PSW-82. Berkeley, CA: Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, 1985. – 16 p.

26 Lee B.S., Alexander M.E., Hawkes B.S., Lynham T.J., Stocks B.J., Englefield P. Information systems in support of wildland fire management decision

making in Canada // Computers and Electronics in Agriculture. – 2002. – Vol. 37., №1-2. – P. 185-198.

27 Эльбуз М. А. Исследование процесса тепломассообмена при испарении и кипении в простых и мезоскопических системах монодисперсных микросфер и мезотрубок: диссертация кандидата технических наук: 05.04.03 / Эльбуз М. А.; [Место защиты: ФГБОУ ВПО "Национальный исследовательский университет "МЭИ"]. – Москва: 2015. – 159 с.

28 Надыров А.Р., Величкин П.С., Степанова О.А. Изменение влажности древесины в процессе сушки // Международный студенческий научный вестник. – 2013. – №3. – С. 64-65.

29 Лыков М.В. Теория сушки / М.В. Лыков – М: Энергия, 1968. – 642 с.

30 Болдырев П.В. Сушка древесины. – СПб: «Профикс», 2002. – 161 с.

31 Орвос М., Сзабо В., Пус Т. Скорость испарения со свободной поверхности нагретой жидкости // Прикладная механика и техническая физика. – 2016. – Т.57., №6. – С. 168-179.

32 Сахаров И. Ю., Махоткин И. А., Махоткин А. Ф., Сахаров Ю. Н. Экспериментальное исследование испарения воды из растворов аммиачной селитры // Вестник технологического университета. – 2015. – Т.18., №22. – С. 41-42.

33 Bulba E.E. The accommodation coefficient of the liquid at temperatures below the boiling [Electronic resource] / E.E. Bulba // European Physical Journal Web of Conferences (EPJ Web of Conferences). – 2015. – Vol.82: Thermophysical Basis of Energy Technologies. – [01024, 4p.].

34 Полянская А.В., Бульба Е.Е. Экспериментальное исследование процессов парообразования при температурах ниже температуры кипения в жидкостях с различной степенью минерализации. В кн.: Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» 26-28 ноября 2018 г.: Материалы конференции / под ред. М.Ю. Орлова. – Томск: Изд-во «Красное знамя», 2019. – С. 239-242.

35 Bulba E. E. Experimental research of moisture evaporation process from biomass in a drying chamber / E. E. Bulba, A. A. Malinovsky // MATEC Web of Conferences. – 2015. – Vol. 23: Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment: April 22-23, 2015, Tomsk, Russia: [proceedings]. – [01053, 4 p.]

36 Шишкина Е.Е., Гороховский А.Г., Миков А.А., Старова Е.В. Анализ способов удаления влаги // Материалы XI Международной научно-технической конференции – Екатеринбург: ФГБОУ ВПО УЛГТУ, 2017. – С. 150-152.

37 Чернышова Д.А. Характеристика основных типов сушильных камер // European Research: сборник статей XIV Международной научно-практической конференции г. Пенза 7 февраля 2018 года. – С. 52-54.

38 Кизина О.А., Адамович А.Л., Гросберг Ю.Г. Анализ современных методов и оборудования для сушки древесины // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, 2011. – №3. – С. 32-37.

39 Сафин Р.Р., Сафин Р.Г., Семенов Ю.П. Сушка и термовлажностная обработка древесных материалов // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений 22-23 сентября 2015 года – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2015. – С. 300-305.

40 Овсянников Д.Л. Проблемы сушки древесины // Материалы Всероссийской ежегодной научно-практической конференции «Общество, наука, инновации» г. Киров, 5-28 апреля 2017 года. – С. 521-526.

41 Шишкина Е.Е. Энергосберегающая технология конвективной сушки пиломатериалов на основе управляемого влагопереноса в древесине: автореферат дис. доктора технических наук: 05.21.05 / Шишкина Елена Евгеньевна; [Место защиты: Сев. (Арктический) федер. университет им. М.В. Ломоносова]. – Архангельск, 2016. – 40 с.

42 Косарин А.А. Технология импульсной сушки древесины: дисс. кандидата тех. наук / А.А. Косарин. – М.: МГУЛ, 2012. – 164 с.

43 Сафин Р. Р. Обзор современных решений сотрудников ФГБ ОУ ВПО «КНИТУ» в области техники и технологии сушки пиломатериалов / Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, П.А. Кайнов // Вестник Казанского государственного технологического университета. Казань. – 2013. – №23. – С. 76-78.

44 Сычевский В.А., Чорный А.Д., Баранова Т.А. Оптимизация аэродинамического режима сушильной камеры // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2016. – т. 59, №3. – С. 260-271.

45 Городских А.А., Грехов П.И. Технологичные способы сушки древесины // Материалы I Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития инженерно-строительной науки и образования» Лесниково, 12 октября 2017 года. – С. 40-44.

46 Ляшенко Г.А., Черепнев И.А., Черная М.А. Применение СВЧ-излучения для технологической сушки дерева и пиломатериалов // Инженерия природопользования. – 2015. – №2. – С. 68-72.

47 Семенова О.Л., Тухватуллин М.И. Совершенствование технологий обработки пиломатериалов сверхвысокочастотной энергией // Российский электронный научный журнал. – 2016. – №4 (22). – С. 210-217.

48 Булат А.Д., Филенков В.М., Обрубов В.А. Электрокинетическая сушка пиломатериалов при энергетическом воздействии электрических и магнитных полей // UNIVERSUM: Технические науки. – 2017. – №2 (35). – С. 39-43.

49 Богданов Д.М. Перспективная конструкция установки для центробежного обезвоживания древесины // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – т.3, №2-2 (13-2). – С. 401-405.

50 Андреев С.А., Семина А.А. Энергоэффективная сушка древесины // Современные инновации в науке и технике: сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции – Курск, 17 апреля 2014 года. – С. 58-61.

51 Дорняк О.Р. Современные проблемы математического моделирования процессов сушки и термовлажностной обработки материалов // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений 22-23 сентября 2015 года – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2015. – С. 36-42.

52 Ермаченков М.Г., Семенов Ю.П., Кладов М.Ю. Внутренние источники теплоты при сушке древесины // Материалы МНТК Плановский – Москва 8-9 сентября 2016 года. – т. 1 – С. 188-192.

53 Дорняк О.Р. Математическое моделирование процессов сушки древесины // ИВУЗ. Лесной журнал. – 2012. – №5. – С. 100-107.

54 Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Старова Е.В., Миков А.А. Анализ процессов сушки древесины существенно неизотермическими режимами // ИВУЗ. Лесной журнал. – 2018. – №2. – С. 88-96.

55 Стрижиченко А.В. Математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса при сушке пиломатериалов // Известия ВоглГТУ. – 2014. – №18 (145). – С. 95-98.

56 Сороковская Н.Н., Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф. Математическое моделирование тепломассопереноса, фазовых и усадки в ленточной сушильной установке // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений 22-23 сентября 2015 года – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2015. – С. 63-67.

57 Разумов Е.Ю., Валиев Ф.Г., Хасаншин Р.Р. Математическая модель кондуктивной сушки коллоидных капиллярно-пористых материалов при давлении ниже атмосферного // Вестник Казанского технологического университета, 2014. – №9. – С. 463-468.

58 Алексеев М.В., Кузнецов Г.В. Численное моделирование процессов тепломассопереноса при сушке древесины кондуктивным способом в условиях

пониженного давления // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – т. 319. – №4: Энергетика. – С. 31-35.

59 Сафин Р.Р., Шамсутдинова А.И., Илалова Г.Ф., Мухтарова А.Р. Вакуумная СВЧ сушка древесины: формулирование математической модели // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2017. – №50. – С.53-56.

60 Шамсутдинова А.И., Кайнов П.А. Моделирование процесса сушки пиломатериалов в вакуумной СВЧ установке // Будущее науки – 2018, т. 4: сборник научных статей 6-ой Международной молодежной научной конференции Курск, 25-25 апреля 2018 года. – С. 313-316.

61 Robert E. Keane. Wildland Fuel Fundamentals and Applications// Springer International Publishing Switzerland.2015 – 191 p.

62 Viney N.R. A review of fine fuel moisture modeling // Int. J. Wildl. Fire. – 1991. – Vol. 1. – №4. – P. 215-234.

63 Голованов А.Н., Власова Т.М., Жмурко Т.С. Определение коэффициента влагопроводности и влагоемкости некоторых лесных горючих материалов // Лесные и степные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия: Материалы 4-й международной конференции – Иркутск, 2001. – С. 31-33.

64 Гришин А.М., Голованов А.Н., Долгов А.А., Лобода Е.Л., Барановский Н.В., Русаков С.В. Экспериментальное и теоретическое исследование сушки лесных горючих материалов // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. – 2002. – т. 305, вып. 2. – С. 31-43.

65 Nigay N. A. Estimation of energy consumption for drying of forest combustible materials during their preparation for incineration in the furnaces of steam and hot water boilers [Electronic resource] / N. A. Nigay [et al.] // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 2019. – Vol. 42, iss. 10. – [9 p.] – Title screen. – [References: 31 tit.].

66 Schunk C., Leutner C., Leuchner M., Wastl C., Mensel A/ Equilibrium moisture content of dead fine fuels of selected central European tree species // International Journal of Wildland Fire. – 2013. – №22. – P. 797-809.

67 Beigi, M., Tohidi M., Toriki-Harchegani M. Exergetic analysis of deep-bed drying of rough rice in a convective dryer // Energy. – 2017. – Vol. 140. – P. 374–382.

68 Архипов В. А., Березиков А. П. Основы теории инженерно-физического эксперимента. – Томск: издательство Томского политехнического университета, 2008 г. – 206 с.

69 Лабунцов Д.А., Ягов В.В. Механика двухфазных систем: Учебное пособие для вузов. – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 374 с.

70 Вукалович М. П. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара / М. П. Вукалович, С. Л. Ривкин, А. А. Александров. – М.: Изд-во стандартов, 1969. – 408 с.

71 Назаренко О.Б. Безопасность жизнедеятельности. Расчёт искусственного освещения. Методические указания к выполнению индивидуальных заданий для студентов дневного и заочного обучения всех направлений и специальностей ТПУ. – Томск: Изд. ТПУ, 2008. – 20 с.

Приложение А
(справочное)

**Analytical review of world experience in researches of moisture removal
processes from energy wood**

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ83	Полянская Алина Вячеславовна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова	Бульба Елена Евгеньевна	к. т. н.		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ ШБИП	Костомаров Пётр Иванович	к. фил. н.		

1 Forest resources as energy raw materials

1.1 Energy wood

Energy (fuel) use of wood began from the time when people learned how to use fire usefully [1]. While wood used to be the main or even the single fuel, in recent years it has become an alternative source of energy. The contribution of biomass to the world energy balance is about 1,8%, to the balance of EU countries – 5%, and to the balance of Russia – 5%.

Currently, obtaining of fuel from wood can be either an independent production or a side production. In this case, energy wood is divided into primary, secondary wood raw materials and wood of special energy plantings. Primary raw materials include: felling residues (bark, twigs, stumps, tree tops, thin meters), non – standard and defective wood, sawmill and woodworking waste (sawdust, shavings, wood chips, lump waste, wood dust), waste from technological processes in which wood is used as a raw material for pulp, paper and other products; secondary-waste that was previously used for various purposes (pallets, sleepers, mine racks) [2].

According to the form and method of production, wood fuel can be untreated (firewood, fuel chips, shavings, sawdust, waste from bucking and sawmilling) and treated (fuel briquettes, pellets, tablets, charcoal, gas generator gas, ethyl alcohol, etc.).

The general approximate resources of raw materials for the production of thermal energy in the case of economic feasibility of using all firewood and waste as fuel are determined by the stages of their production (table 1).

Table 1 – Estimated wood fuel resources for heat production [3]

Stages of obtaining wood raw materials for the production of thermal energy	Raw material resources for fuel use	
	as a percentage of production volume	volume for every 1000 m ³ of processed raw materials by stages, m ³
Bucking whips: - off-balance sheet lump waste - firewood	2-3 10-40	20-30 100-400
Primary processing (raw material cutting): - sawdust - lump or soft waste	8-12 14-30	80-120 140-300
Secondary processing (production of joinery and construction products): - sawdust, shavings, lump waste	10-60	100-600

Using wood raw materials as fuel implies necessary to take into account its thermal properties. The main characteristic of wood fuel is the indicator of the lowest heat of combustion (calorific value) Q_{low}^c , Gcal/m³ – the amount of heat released during the combustion of 1 m³, without taking into account the heat spent on the evaporation of moisture formed during the combustion of this fuel. For wood calorific value depends on the type of wood and its moisture content. Table 2 shows the values of the calorific value of hardwood at different humidity levels.

Table 2 – Calorific value of hardwood at different humidity [4]

Wood species	Birch	Poplar
Calorific value of freshly cut wood (humidity about 50%), Gcal/m ³	1,23	0,93
Calorific value of semi-dry firewood (humidity is 30%), Gcal/m ³	1,476	1,116
Calorific value of wood that has lain under a canopy for at least for 1 year (humidity is 2%), Gcal/m ³	1,722	1,302

There is an opinion [5] that specifying the value of only the lowest heat of combustion of wood fuel during the evaluating its energy potential leads to an overestimation of the efficiency of fuel-burning plants. To clarify information about the composition of various types of wood fuel and the values of its thermal characteristics, the values of the highest and lowest calorific values were determined separately for wood-birch, alder and aspen, and the average for hardwoods, for coniferous species according to their elementary composition, separately for bark.

In [6, 7], the economic aspects of using wood fuel for energy needs were discussed. In [6], the author points out that in the conditions of constantly rising energy prices, the use of wood fuel in the form of firewood and waste in the production of heat energy allows to meet the needs in heat for own needs: for drying lumber, for heating production facilities, for the production of thermal energy for sale. Autonomous boilers that run on fuel that does not need to be purchased ensure the independence of such enterprises from energy supply organizations.

In [7], the important role of bioenergy technology for remote heat and power supply of low-power consumers (for example, forest settlements) that can be supplied with heat and electricity from autonomous wood-fueled sources was emphasized.

1.2 Forest combustible materials

Forest combustible materials (FCM) are forest plants, their morphological parts and plant residues of various degrees of decomposition that can burn in forest fires [8]. The division of FCM into classes can be carried out at various levels, for example, based on the elementary parts of FCM complexes, when individual ground cover plants, fallen leaves, and morphological parts of trees are considered [9].

In accordance with the classification of the national fire danger system of the United States, FCM are divided into dead and alive, as well as «thin fuel» – ground cover of dried herbaceous plants. This division is correct for standard air conditions are used, namely air temperature 26,5°C, relative humidity 20%.

Alive fuel materials are divided into 2 classes: grasses and herbaceous plants; needles, foliage and branches with a diameter of no more than 6 mm. Dead materials are divided into 4 classes depending on the time lag. A time lag is a period of time during which two-thirds of the amount of moisture, that would have evaporated from the sample under standard conditions, are lost [10].

Another common FCM classification system was developed in Canada as part of the fire hazard prediction system. The FCM type is one of the input parameters of the forest Fire Behavior Prediction subsystem (FBP) There are 5 fuel models that include 18 types of fuel [11]. The main fuel models in this classification are:

1. coniferous fuels (fir and pine needles are considered the most flammable);
2. herbal fuels (the model includes herbal fuel, characteristic for spring and for late summer);
3. mixed fuels (the model describes different combinations of coniferous and deciduous species);
4. leafy fuels (leafless and green);
5. chopped fuels (remnants of human activity, e.g. the remains of wood species after logging).

In the Canadian classification of FCM, three large groups can be distinguished: soil (humus, peat, roots); ground (leaf litter and needles, grasses, small shrubs, large windfall); crown fuel (branches with needles and leaves, dead branches) [11].

In Russia, classification was developed by N.P. Kurbatsky [8]. FCM were divided according to their role in the process of burning forest biogeocenosis: mosses and lichens; litter (decayed litter, humus peat horizon); grasses and shrubs (with wood, self-seeding, undergrowth); dead wood remains (dead wood, twigs, stumps, felling remains); undergrowth and underwood (shrub); needles and foliage of growing trees; trunks of growing trees and live branches (more than 7 mm thick).

2 Wood drying

2.1 Information about the evaporation

The drying process consists of removing moisture from the material by evaporation. The contained moisture becomes vaporous and is removed to the environment. During drying, evaporation processes take part not only in the vapor-gas mixture and on the surface, but also inside the solid material [12].

Wood drying occurs by moving moisture from the middle to the surface through a system of macrocapillaries filled with air (cell cavities, intercellular spaces), and through a system of microcapillaries in cell walls and water evaporation from the surface. Moisture moves through the macrocapillaries in the form of steam, and through the microcapillaries – mainly in the form of liquid.

Wood drying is a complex process, the nature of which is determined by the simultaneous occurrence of a number of physical phenomena, including [13]: heat transfer to the material from the drying agent or heat source; thermal conductivity and moisture transfer inside the material; moisture loss to the environment. Main factors determining mass transfer of drying are humidity, temperature and pressure gradients.

According to the classification of A.V. Lykov [14], wet materials can be divided into three types depending on their basic colloidal-physical properties: typical colloidal bodies, capillary-porous bodies and capillary-porous colloidal bodies. Wood belongs to capillary-porous colloidal materials. The walls of its capillaries are elastic and narrow when moisture is removed. The surface layers give a large shrinkage during drying, so that the capillaries become conical, facing holes with a smaller radius outwards, which helps to move moisture to the surface of the body.

By analogy with heat exchange, the intensity of moisture exchange is usually determined in relation to the entire surface area of the drying material. In reality, water evaporation during drying occurs only from the meniscus of capillaries that come to the surface of the wood, the relative total area of which is significantly less than the surface area of the drying material.

Drying processes are usually analyzed by curves of average humidity of wood (drying curves), changes in time of intervals of average humidity and time (drying speed curves), its temperature (temperature curves) and curves of moisture distribution over the thickness of the assortment at various stages of the process (Fig. 1).

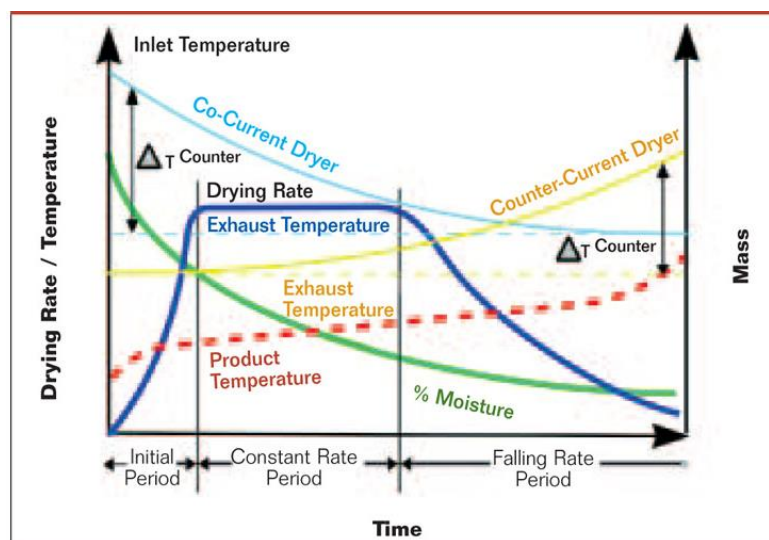


Figure 1 – Different drying curves

The cycle of wood drying is usually divided into separate periods that occur at different speeds [15].

The first period is the heating of wood, which proceeds without removing moisture. The moisture located in the outer zones is heated more than in the inner ones, which causes it to move from the outside to the inside. After the warm-up period expires the temperature becomes uniform in all layers of the product.

The second period is the period of constant drying speed from the high initial humidity W_{prim} to the so-called «critical» W_{crit} , slightly exceeding the value of the limit of hygroscopicity $W_{crit} \approx W_{sat.lim} = 28 \div 30\%$, which means that all free moisture is removed. During this period, moisture evaporation occurs from the surface, saturation on moisture coming through the capillaries from the inner layers. The

temperature of the material also remains constant due to the existing thermal balance between the amount of heat perceived by the material and the amount of moisture given up for evaporation.

The third period is the period of falling drying speed, at this stage the bound moisture is removed from the cell walls and the sample may decrease in linear and volumetric dimensions. The continuous drop of the drying speed is explained by a decrease of the partial pressure of water vapor on the surface of the material due to a decrease of its humidity.

2.2 Types of drying chambers

Drying is one of the thermal methods of wood dewatering, in which there is a phase transformation of moisture into steam as a result of heat exposure. There was overview of the main methods for removing moisture from wood in [16].

Depending on the heat source, there are natural and artificial drying of wood. Natural methods include atmospheric and transpirational (biological) drying. These methods use natural heat sources – solar radiation and environmental parameters. Atmospheric drying is based on the use of atmospheric air as a drying agent without its artificial heating. Transpiration drying of trees was achieved by stopping the supply of moisture from the root system of the tree and the subsequent evaporation of the capillary moisture from the trunk by the crown.

To speed up the process of obtaining high-quality products from raw materials, artificial wood drying is used in special drying plants (chambers), the main types of which were discussed in [17].

In artificial drying, heat transfer to the material is carried out by: a gaseous medium (air, flue gas or superheated steam); a liquid medium (kerosene, oil, etc.); a solid body (drying in contact); IR rays; electric current; electromagnetic field.

Comparative analysis [18] of the most common traditional as well as modern methods of wood drying has shown that most of the traditionally used methods do not provide the required quality of the final product and are characterized by a long drying process and high energy consumption. Based on the given technical and economic

indicators of real drying plants, it was concluded that the most promising methods of wood drying are microwave drying and combining microwave drying with vacuuming or blowing wood with a stream of hot air.

Idealized from the point of view of energy saving, the scheme of the material drying process is as follows [19]. Heat energy, obtained from alternative sources, without loss to the environment, is supplied to all points of the material, causing the moisture evaporation. Heat energy of moisture is also captured and reused without loss. The most common «alternative energy source» is the heat from wood waste incineration. Reduction of heat losses to the environment is provided by modern building materials for dryers. Secondary use of the heat energy of evaporated moisture can be realized by using heat pumps, which will reduce the cost of reducing the relative humidity of the drying agent by 3-5 times.

In [20], the problems of using a heat transfer agent in drying plants were considered. Currently, manufacturers are forced to dry the material at a temperature of 50-60 °C due to the design features of chambers with water heaters (the coolant was water with a temperature of 90-70°C). The use of steam is currently very limited due to the high cost of maintaining a steam plant. The use of electric drying chambers in modern conditions was proved unprofitable. Taking into account the level of energy prices and the availability of energy types, it makes sense to talk about the use of different energy sources in different drying methods.

Currently, the main industrial method of drying wood is convective drying, which is achieved by convective circulation of specially heated air through the dried material. In [21], it was noted that a significant reduction of energy consumption during convective drying is possible in the following areas: the use of chambers with natural circulation, with the complete elimination of power consumption for fan drive and optimization of drying processes.

The principle of «pulse» modes was laid down in the basis of the technology of vacuum-convective drying chambers [22]. The drying consists of successive stages of heating wood and vacuuming, which is characterized by intensive evaporation of moisture from the surface of the material. During the heating stage, thermal energy is

accumulated. During the vacuuming process, the electric heating elements were switched off and the wood is dried using pre-accumulated heat energy.

In [23], attention was paid to the aerodynamic mode of drying chambers during convective drying of wood in order to increase energy efficiency and reduce uneven energy supply. It was noted that the formation of inhomogeneity of the velocity field both along the supply path and during distribution over the entire surface of the dried material significantly affects the heat and mass exchange processes. To optimize the aerodynamics of the drying unit, it was recommended to reduce the speed of the drying agent in the chamber by reducing the pressure drop created by the fan.

In [24, 25], the technologies of wood drying using ultrahigh frequency currents were presented. The material was heated gradually, starting from its outer layers due to the phenomenon of thermal conductivity when drying was occurred by conventional methods. At the same time, heating the inner layers of the material to the temperature of intensive vaporization, in comparison with microwave heating, due to the low thermal conductivity of wood, requires much more time.

An energy-efficient method of drying wood with combined heating of the drying chamber was describes [26]. One part of the heat energy was supplied to the drying chamber, using a heat generator (a water-heating boiler that works on wood waste) and heat exchangers. The other part of the heat energy was converted from the low-potential heat energy of the environment by a heat pump and was supplied to the drying chamber from the entire inner surface of its walls. It was achieved due to the increased temperature of the inner hollow walls of the drying chamber due to the heat transfer agent circulating inside them. In addition, the heat pump evaporator uses a spent drying agent. This also increases the efficiency of the heat pump and reduces the energy cost of drying.

3 Mathematical modeling of heat and mass transfer processes during wood drying

In [27], the types of mathematical models of drying that are most often used in the studies of drying processes and heat-humidity treatment of materials were

considered. There are two qualitatively different types of modeling in relation to porous media, including wood-modeling the «structure» of the sample and modeling its «behavior» (heat and mass transfer processes).

The first type includes all models of water and heat transfer based on Lykov's equations for a capillary-porous body. At the same time, geometric modeling of a porous system is not performed. All transfer parameters are averaged over the volume of the dried medium. If dewatering is performed under isothermal conditions, the diffusion equation is used to study the kinetics and dynamics of moisture content.

The second type is mathematical models of drying based on the mechanics of multiphase systems. Their peculiarity is that under various external influences on the sample, different behavior of the material phases is possible, on the other hand the models also take into account the effects of phase interaction. Equations for multiphase systems are obtained by volume averaging of micro-equalizations for macroscopic parameters of each phase by the volume of the corresponding phase.

The development of mathematical modeling of drying processes is hindered by a lack of knowledge about the mechanisms of interaction of phases, the structure of the material, which changes in relation to the processes of heat and mass transfer.

A mathematical model was proposed to describe the processes of heat and mass transfer in wood during heating with the presence of heat sources [28]. The intensity of internal heat release during drying was determined by the rate of mass change and the thermal effects of the processes. The thermal effect of removing of free moisture was determined by the latent heat of evaporation. The removal of bound water and the destruction of its chemical bonds with wood matter occurs in different temperature ranges, so the energy component of the stages is different. Thermal effects at certain stages of the drying process were obtained by differential scanning calorimetry (DSC).

A mathematical model of thermophysical processes occurring during wood drying, as in a three-phase system (solid, liquid and gaseous phases) was developed [29]. It takes into account a wide range of physical and structural factors. Additional averaging of hydrodynamic parameters was performed for the volumes of free water, water in thin layers and wetting films during modeling to describe the transfer of the

liquid phase in the process of wood drying. The mathematical model includes conservation equations on interfacial surfaces. At the liquid-vapor interface, the nonequilibrium of phase transitions was taken into account. The kinetics of non-equilibrium phase transitions was described by the Hertz-Knudsen equation. The correlation between pressure and temperature along the saturation line was defined the Clapeyron-Clausius equation. The nonequilibrium scheme of phase transitions assumes the presence of a temperature jump in the boundary layer of steam.

In [30], a model of heat and mass transfer in low-temperature convective drying was developed. In this paper, a computational experiment was performed to determine the effect of thermal and moisture conductivity on the overall process of heat and mass transfer in a colloidal capillary-porous body, since a change in the direction of the temperature gradient leads to a significant change in the density of the moisture flow. Churaev's calculation formulas were used in developing the mathematical model. In capillary-porous bodies, such as wood, moisture exchange with the medium occurs due to the removal of liquid from the capillaries that come to the surface. The system of Deryagin-Nerpin equations was used to estimate the contribution of the film transfer mechanism to the total moisture flow.

A numerical study of heat and mass transfer during wood drying by a conductive method under reduced environmental pressure using a model of frontal moisture evaporation [31] was performed. During drying, a mobile moisture evaporation front is formed in the wood, so the solution area was divided into two zones: dry and wet wood. Over time, the evaporation front moves deeper into the material, and the resulting vapor due to the pressure drop is filtered in the direction of the heated boundary. The porous structure of wood differs significantly in deciduous and coniferous species. It was assumed that the pores communicate with each other.

The system of equations describing the process under consideration and the corresponding boundary conditions were written in accordance with the general theory of heat and mass transfer in porous media under conditions of physical and chemical transformations. The mass evaporation rate W_{ev} was determined from the expression of the Hertz-Knudsen law. Energy absorption during moisture evaporation in the

porous structure of wood was taken into account by introducing the product of numbers $W_{ev} \cdot Q_{ev}$ (where Q_{ev} – the thermal effect of evaporation) into the boundary condition.

In [32], a one-dimensional mathematical model was created to describe the process of microwave drying of wood based on the mechanism of moisture and heat transfer in wood. To simplify the model, the following assumptions were made. Wet wood is a capillary-porous medium consisting mainly of wood matrix, free water, sorption water and water vapor, which are considered continuous phases of high critical moisture content. The size and internal structure of the wood will not change during vacuum microwave drying. The migration rate of free water and water vapor corresponds to Darcy's law.

In [33], the mathematical model developed in [33] was tested for adequacy by experiments using a microwave oven with a nominal power of 800 W and a frequency of 2450 MHz placed in a vacuum chamber.

4 Features of drying of forest combustible materials

The study of the drying process of forest fuels is an important aspect both for creating systems for predicting forest fires, and for using FCM as a fuel.

There are two drying modes – kinetic and diffusion. The kinetic mode is implemented when drying is limited by evaporation (desorption) of water from the outer surface of a porous moisture-containing body. Diffusion mode occurs when drying is limited to the transfer of moisture or vapor directly inside the body. FCM drying is mainly characterized by a kinetic mode, with the exception of drying thick branches at high temperatures.

The main tasks in the study of FCM drying is determination the mechanism, time of the process, the thermokinetic parameters of the studied type of FCM and its moisture content. In the researches [35, 36, 37], the drying process were described using numerical and experimental methods under various boundary conditions.

Humidity of FCM is due to the essential features of this material: hygroscopicity, which characterizes the ability of a substance to attract and retain liquid molecules, a feature of the cellular structure and thermal properties of FCM particles.

These indicators will differ for alive and dead fuels, thereby determining the moisture content in them. So, the movement of water through the particles of dead fuel is caused by the processes of evaporation from the cell walls, the diffusion of steam through the voids of cells and its condensation on the walls of cell cells. As a result, the water evaporates from the surface of the FCM. The humidity dynamics of solid fuel is defined as the difference between the pressure of water vapor in the fuel particle and the atmosphere. The process of fluid movement in a living fuel is slightly different. Water moves through the cells through osmosis and cell voids by diffusion and capillary forces. Diffuse water is pulled to the foliage through the conductive xylem tissue in the wood by a tensile pressure caused by the water potential, which is controlled by a vapor pressure gradient. As the soil water is depleted, the diffusion gradient becomes stronger, exerting more tensile pressure to overcome the tensile forces from the soil on the bound water [34].

FCM humidity is often measured by thermogravimetric method, which involves drying samples in a furnace and then determining the difference in the weight of samples before and after drying. The method is quite simple and effective. The most accurate results can be obtained when drying at lower temperatures (80-85 °C) for longer periods of time (48-72 h), which prevents undesirable changes in the organic structure of the fuel particle.

The moisture content is described as a function of the relative humidity and temperature of the medium, taking into account the type of FCM if simulating the processes of steam exchange, adsorption and desorption is carried out [35].

Information about heat and mass transfer in lamb elements was obtained in the course of experimental studies. It is necessary for the construction of mathematical models. So in [36], based on the approach to the process of moisture exchange of A.V. Lykov, the coefficients of specific moisture capacity and moisture conductivity were determined. The analysis of experimental data revealed that these coefficients decrease with increasing temperature. This dependence is especially noticeable for cedar needles, which is explained by the features of its internal structure (the presence of 2 water outlets and 12 stomata).

In [37] the results of experimental and numerical studies of liquid evaporation from the surface of FCM of coniferous trees of the Tomsk region were collected for various cases: evaporation of free and bound moisture during drying in a wind tunnel, evaporation of droplets from a rough surface. The rate of evaporation of free moisture was compared with the rate of evaporation of moisture associated with the material by physical and chemical bonds and physical and mechanical bonds. It was found that there is no mass exchange between dry needles and water during the evaporation of drops from a rough surface. Alive needles absorb moisture from a drop through the stomata, so the rate of evaporation of a drop from alive needle is higher than the rate of evaporation of a drop located on a dry conifer. The stomata are atrophied in dry needles, and moisture does not flow from the drop into the needles.

Authors of [38] presented the results of experimental studies of heat and mass transfer processes during the thermal preparation of wood biomass for combustion in the furnaces of steam and hot water boilers, performed to assess the energy consumption for its drying. The mass rates of moisture absorption at different temperatures of the drying agent-air ($333\div 393$ K) were established. It was shown that the total drying time (under the same conditions) practically does not depend on the type of biomass. It was established that at the initial humidity of forest combustible materials from 50% to 70%, the heat consumption for complete removal of moisture was from 10% to 13% of the calorific value of these materials.

Experimental and theoretical studies of the FCM drying process are conducted not only in Russia. German scientists experimentally determined the values of the equilibrium moisture content of dead FCM [39]. Experiments were performed using a «climate chamber» over various saturated salt solutions. Curves of the equilibrium moisture content in samples of Norwegian spruce, common pine and European beech litter were obtained. The authors explain the difference between the curves for needles and leaves by differences in the physical and chemical properties of materials.

References

- 1 Onuchin E.M., Anisimov P.N. History and prospects of technologies and technical means of wood harvesting and processing for energy purposes // Actual problems of the forest complex. – 2013. – №37. – P. 136-142.
- 2 Fokin S.V., Fomina O.A. About the main types of energy wood // Forest Engineering: materials of scientific-practical conference with international participation Yakutsk, May 30-31, 2018. – P. 273-275.
- 3 Zalesov S.V. Resources of unclaimed wood for the needs of bioenergy in the forests of the Ural Federal district // Actual problems of development of biotechnologies: proceedings of the international scientific-practical conference Yekaterinburg: Ural agricultural publishing house, 2013. – P. 70-72.
- 4 Sharapa S.P. Modern technologies of burning local fuels in small capacity boilers // Energy and management. – 2016. – №1. – P. 29-32.
- 5 Stepanov V.S., Stepanova T.B., Starikova N.V. Estimation of heat engineering characteristics of wood fuel // Systems. Methods. Technologies. – 2015. – №1 (25). – P. 117-123.
- 6 Menshikov B.E., Kurdyшева E.V. Resources and main directions of using wood raw materials for heat energy production at logging enterprises // Russian Forests and their economy. – 2018. – №1 (64). – P. 59-65.
- 7 Krylova A.G., Lavrichenko V.A. Economic aspects of wood fuel use in small power engineering // ECONOMICS. – 2018. – №2 (34). – P. 5-10.
- 8 Fire safety. Encyclopedia. – M.: FGU VNIPO of EMERCOM of Russia, 2007. – 416 p.
- 9 Gusev V.G., Lopukhova E.L., Dubovoy V.K. Classification and general properties of forest combustible materials // University news. Forest magazine. – 2012. – №1. – P. 134-145.
- 10 Cohen J.D., Deeming J.E. The National Fire-Danger Rating System: basic equations // Gen. Tech. Rep. PSW-82. Berkeley, CA: Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, 1985. – 16 p.

11 Lee B.S., Alexander M.E., Hawkes B.S., Lynham T.J., Stocks B.J., Englefield P. Information systems in support of wildland fire management decision making in Canada // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2002. – Vol. 37., №1-2. – P. 185-198.

12 Elbuz M.A. Investigation of heat and mass transfer during evaporation and boiling in simple mesoscopic systems of monodisperse microspheres and mesotubes: thesis of PhD in Technical Sciences: 05.04.03 / Elbuz M.A. [Place of defense of a thesis: FGBOU VPO «National research university MPEI»]. – M.: 2015. – 159 p.

13 Nadyrov A.P., Velichkin S.P., Stepanov O.A. Change of wood moisture in the drying process // *International student scientific bulletin*. – 2013. – №3. – P. 64-65.

14 Lykov M.V. *Theory of drying* / M.V. Lykov – M: Energy, 1968. – 642 p.

15 Boldyrev P.V. *Wood drying*. – SPb: «Profix», 2002. – 161 p.

16 Shishkina E.E., Gorokhovskiy A.G., Mikov A.A., Starova E.V. Analysis of methods for removing moisture // *Materials of the XI International scientific-technical conference Yekaterinburg: FSBEI HVE UISTU*, 2017. – P. 150-152.

17 Chernyshova D.A. Characteristics of the main types of drying chambers // *European Research: Proceedings of the XIV International scientific-practical conference Penza, February 7, 2018*. – P. 52-54.

18 Kizina O.A., Adamovich A.L., Grozberg Yu.G. Analysis of modern methods and equipment for wood drying // *Bulletin of Polotsk state university*, 2011. – №3. – P. 32-37.

19 Safin R.R., Safin R.G., Semenov Yu.P. Drying and heat-humidity treatment of wood materials // *Actual problems of drying and heat-water treatment of materials in various industries and agro-industrial complex: Proceedings of the 1st international Lykov's scientific readings September 22-23, 2015 Kursk: JSC «University book»*, 2015. – P. 300-305.

20 Ovsyannikov D.L. Problems of wood drying // *Proceedings of the all-Russian annual scientific-practical conference «Society, science, innovation» Kirov, April 5-28, 2017*. – P. 521-526.

21 Shishkina E.E. Energy-saving technology of convective drying of lumber based on controlled moisture transfer in wood: Abstract of thesis of PhD in Technical Sciences: 05.21.05 / Elena Shishkina; [Place of defense of a thesis: North. (Arctic) Federal University of M. V. Lomonosova]. – Arkhangelsk, 2016. – 40 p.

22 Safin R.R. Review of modern solutions of employees FSBEI HE «KNRTU–KAI» in the field of equipment and technology for drying lumber / R.R. Safin, R.R. Khasanshin, P.A. Kainov // Bulletin of the Kazan state technological University. Kazan. – 2013. – №23. – P. 76-78.

23 Sychevsky V.A., Chorny A.D., Baranova T.A. Optimization of the aerodynamic mode of the drying chamber // Energy. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS. – 2016. – Vol. 59, №3. – P. 260-271.

24 Lyashenko G.A., Cherepnev I.A., Chernaya M.A. Application of microwave radiation for technological drying of wood and lumber // Environmental engineering. – 2015. – №2. – P. 68-72.

25 Semenova O.L., Tukhvatullin M.I. Improvement of technologies for processing lumber with ultra-high-frequency energy // Russian electronic scientific journal. – 2016. – №4 (22). – P. 210-217.

26 Andreev S.A., Semina A.A. Energy-efficient drying of wood // Modern innovations in science and technology: Proceedings of the 4th International scientific-practical conference Kursk, April 17, 2014. – P. 58-61.

27 Dornyak O.R. Modern problems of mathematical modeling of drying processes and heat and humidity treatment of materials // Actual problems of drying and heat-water treatment of materials in various industries and agro-industrial complex: Proceedings of the 1st international Lykov's scientific readings September 22-23, 2015 Kursk: JSC «University book», 2015. – P. 36-42.

28 Yermachenkov M.G., Semenov Yu.P., Kladov M.Yu. Internal heat sources for drying wood // Materials of MNTC Planovsky Moscow 8-9 September, 2016. – Vol. 1 – P. 188-192.

29 Dornyak O.R. Mathematical modeling of wood drying processes // News of higher educational institutions «Forest magazine». – 2012. – №5. – P. 100-107.

30 Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E., Starova E.V., Mikov A.A. Analysis of wood drying processes under non-isothermal conditions // News of higher educational institutions «Forest magazine». – 2018. – №2. – P. 88-96.

31 Alekseev M.V., Kuznetsov G.V. Numerical modeling of heat and mass transfer processes during wood drying by a conductive method under low pressure conditions // News of TPU. – 2011. – Vol. 319. – №4: Power engineering. – P. 31-35.

32 Safin R.R., Shamsutdinova A.I., Yalova G.F., Mukhtarov R. A. Vacuum microwave drying of wood: the formulation of mathematical models // Current problems of the forest complex, 2017. – №50. – P. 53-56.

33 Shamsutdinova A.I., Kainov P.A. Modeling of the process of drying lumber in vacuum microwave installation // Future of science-2018, Vol. 4: Proceedings of the 6th International youth scientific conference Kursk, April 25-25, 2018. – P. 313-316.

34 Robert E. Keane. Wildland Fuel Fundamentals and Applications// Springer International Publishing Switzerland. –2015. – 191 p.

35 Viney N.R. A review of fine fuel moisture modeling // Int. J. Wildl. Fire. – 1991. – Vol. 1. – №4. – P. 215-234.

36 Golovanov A.N., Vlasova T.M., Zhmurko T.S. Determination of coefficient of moisture conductivity and moisture capacity of forest combustible materials // Forest and steppe fires: occurrence, distribution, extinguishing, environmental consequences: Proceedings of the 4th international conference Irkutsk, 2001. – P. 31-33.

37 Grishin A.M., Golovanov A.N., Dolgov A.A., Loboda E.L., Baranovsky N.V., Rusakov S.V. Experimental and theoretical study of drying of forest combustible materials // News of TPU. – 2002. – Vol. 305, iss. 2. – P. 31-43.

38 Nigay N.A. Estimation of energy consumption for drying of forest combustible materials during their preparation for incineration in the furnaces of steam and hot water boilers [Electronic resource] / N. A. Nigay [et al.] // Energy Sources, Part A. – 2019. – Vol. 42, iss. 10. – [9 p.] – Title screen. – [References: 31 tit.].

39 Schunk C., Leutner C., Leuchner M., Wastl C., Mensel A./ Equilibrium moisture content of dead fine fuels of selected central European tree species // International Journal of Wildland Fire. – 2013. – №22. – P. 797-809.

Приложение Б

Результаты расчета площади испарения веток

Таблица Б.1 – Расчет площади испарения для веток березы (навеска №1)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$	
Ветка №1	4,5 9,5 134,235*	3,5 31 340,69	6 5 94,2	3,5 28,5 313,215	4,5 5 70,65	3 29 273,18	5 6 94,2	2,5 31 243,35	–	–	1563,72
Ветка №2	5,5 8 138,16	4 18 226,08	5,5 5,5 94,985	3,5 80 879,2	6 5 94,2	3,5 33 362,67	–	–	–	–	1795,295
Ветка №3	4,5 13,5 190,755	6,5 6 122,46	4 40 502,4	7 6 131,88	3,5 35,5 390,145	5,5 7,5 129,525	3,5 36 395,64	–	–	–	1862,805
Ветка №4	4 33 414,48	5 4,5 70,65	4 31 389,36	6 6 113,04	4 29 364,24	6 5 94,2	3,5 30 329,7	6 7 131,88	–	–	1907,55
Ветка №5	4 34 427,04	5 5 78,5	4 26 326,56	3,5 41 450,59	4,5 6 84,78	4 35 439,6	–	–	–	–	1807,07
Ветка №6	6 5,5 103,62	4,5 50 706,5	4,5 17 240,21	6 9 169,56	4,5 28,5 402,705	5 38 596,6	–	–	–	–	2219,195
Ветка №7	5 46 722,2	7 4,5 98,91	5 24 376,8	6,5 5 102,05	4,5 32 452,16	7 5 109,9	4,5 26 367,38	7,5 4,5 105,975	–	–	2335,375
Ветка №8	7 10,5 230,79	8,5 4 106,76	7 19 417,62	9 7 197,82	7 67 1472,66	10 9 282,6	7 18,5 406,63	9 9,5 268,47	–	–	3383,35
											16874,36

Таблица Б.2 – Расчет площади испарения для веток березы (навеска №2)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$	
Ветка №1	4 38,5 483,56	6 6 113,04	4 30 376,8	6 7,5 141,3	3,5 25,5 280,245	6 6 113,04	3,5 36 395,64	–	–	–	1903,625
Ветка №2	5,5 8,5 146,795	4,5 30 423,9	5,5 4,5 77,715	4 28,5 357,96	5,5 5,5 94,985	4,5 23 324,99	5 14 219,8	4 31,5 395,64	–	–	2041,785
Ветка №3	4,5 3,5 49,455	4 18 226,08	7 5 109,9	4,5 55 777,15	6 5 94,2	4,5 29 409,77	6,5 4,5 91,845	5 16 251,2	–	–	2009,6
Ветка №4	5 14 219,8	4,5 35 494,55	5,5 4 69,08	4 26 326,56	5,5 3,5 60,445	4 35 439,6	5,5 4,5 77,715	4 16,5 207,24	–	–	1894,99
Ветка №5	5 24,5 384,65	7 5 109,9	5 29 455,3	6,5 6 122,46	4,5 60 847,8	8 7 175,84	4,5 13,5 190,755	–	–	–	2286,705
Ветка №6	5,5 32 552,64	7 5 109,9	5 30 471	6,5 5 102,05	5 26 408,2	7,5 5,5 129,525	5 15,5 243,35	6,5 5 102,05	5 20,5 321,85	–	2440,565
Ветка №7	6,5 11 224,51	8,5 6 160,14	6 26 489,84	7,5 7 164,85	6 29,5 555,78	7,5 7,5 176,625	6,5 25 510,25	8,5 7,5 200,175	7 28 615,44	–	3097,61
Ветка №8	4,5 25 353,25	6 6,5 122,46	4,5 35,5 501,615	6,5 6,5 132,665	4 31,5 395,64	7 8,5 186,83	4 35 439,6	–	–	–	2132,06
											17806,94

* Снизу вверх в каждой ячейке представлены d , мм; l , мм; S , мм².

Таблица Б.3 – Расчет площади испарения для веток березы (навеска №3)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	ΣS, мм ²	
Ветка №1	5 14,5 227,65	4,5 33,5 473,355	6,5 5 102,05	4,5 18 254,34	6,5 4 81,64	4,5 16 226,08	5,5 12 207,24	4,5 42,5 600,525			2172,88
Ветка №2	5 48 753,6	6 7 131,88	4,5 28,5 402,705	6 6 113,04	4,5 29 409,77	6,5 3,5 71,435	4,5 25 353,25	–	–		2235,68
Ветка №3	3,5 34 373,66	4,5 7 98,91	4 23,5 295,16	5,5 7 120,89	4 34 427,04	6 7,5 141,3	3,5 31 340,69	–	–		1797,65
Ветка №4	5 27 423,9	8 7 175,84	5 58 910,6	6,5 5,5 112,255	4,5 40 565,2	7 5 109,9	–	–	–		2297,695
Ветка №5	4,5 20 282,6	4 49 615,44	3,5 55 604,45	5 5,5 86,35	3,5 16,5 181,335	–	–	–	–		1770,175
Ветка №6	5 24,5 384,65	7,5 7 164,85	4,5 32,5 459,225	6 7 131,88	4,5 40 565,2	6,5 7 142,87	4 29,5 370,52	–	–		2219,195
Ветка №7	4 42,5 533,8	5,5 6,5 112,255	4 23 288,88	6 6 113,04	4 21 263,76	5,5 4,5 77,715	4,5 24,5 346,185	5 14,5 227,65			1963,285
Ветка №8	4,5 17 240,21	6 5,5 103,62	4 17,5 219,8	5,5 5,5 94,985	4,5 50 706,5	5,5 5,5 94,985	4 46,5 584,04	–	–		2044,14
											16500,7

Таблица Б.4 – Расчет площади испарения для веток березы (навеска №4)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	ΣS, мм ²	
Ветка №1	6,5 47 959,27	8,5 7 186,83	6,5 5 1020,5	10 8 251,2	7 23 505,54	–	–	–	–		2923,34
Ветка №2	4,5 13 183,69	6,5 6 122,46	4 37 464,72	6 6 113,04	3,5 35 384,65	6 6 113,04	3,5 4 43,96	5 7 109,9	3 24 226,08		1761,54
Ветка №3	4 46,5 584,04	3,5 31 340,69	4,5 4 56,52	3,5 27 296,73	5 5,5 86,35	3,5 21 230,79	4,5 5 70,65	3 7 65,94	–		1731,71
Ветка №4	4,5 23 324,99	5 4 62,8	3,5 45,5 500,045	5,5 4,5 77,715	3,5 34 373,66	4,5 4 56,52	3 30 282,6	–	–		1678,33
Ветка №5	4,5 13 183,69	5,5 4,5 77,715	4 25 314	5 5 78,5	4 30 376,8	5,5 4 69,08	4 42 527,52	5,5 5,5 94,985	4 16 200,96		1923,25
Ветка №6	5,5 15 259,05	4,5 56,5 798,345	5,5 5 86,35	4,5 16,5 233,145	5 4,5 70,65	4,5 21,5 303,795	5,5 4,5 77,715	4 22 276,32	–		2105,37
Ветка №7	5 36,5 573,05	7 7 153,86	5 33,5 525,95	6,5 6,5 132,665	5 58 910,6	5,5 5,5 94,985	–	–	–		2391,11
Ветка №8	3,5 29 318,71	4,5 4 56,52	3,5 33 362,67	4,5 4,5 63,585	3,5 31 340,69	4 5 62,8	3 28,5 268,47	4,5 7 98,91	–		1572,355
											16087,005

Таблица Б.5 – Расчет площади испарения для веток березы (навеска №5)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$
Ветка №1	4,5 47 664,11	6 6 113,04	4 28,5 357,96	5 6 94,2	3,5 25,5 280,245	5,5 8 138,16	4 27 339,12	–	–	1986,835
Ветка №2	5 20 314	6 5 94,2	5 28 439,6	6 5 94,2	5 21 329,7	7,5 9 211,95	5,5 27 466,29	8 6 150,72	5,5 26 449,02	2549,68
Ветка №3	7 10 219,8	5,5 23 397,21	6,5 6,5 132,665	5,5 30 518,1	7 8 175,84	5 25,5 400,35	7 6,5 142,87	5 33 518,1	–	2504,935
Ветка №4	4,5 10,5 148,365	4 47 590,32	4,5 4 56,52	3,5 34 373,66	5 10 157	3 34,5 324,99	4 6 75,36	–	–	1726,215
Ветка №5	4 14,5 182,12	6 5 94,2	4,5 48 678,24	5,5 6 103,62	4,5 22 310,86	5 5 78,5	4,5 35 494,55	–	–	1942,09
Ветка №6	4,5 20,5 289,665	5,5 5 86,35	4,5 38 536,94	5 11,5 180,55	3,5 35,5 390,145	7 4,5 98,91	4 31 389,36	–	–	1971,92
Ветка №7	5 97 1522,9	6,5 5 102,05	5 31 486,7	4,5 9,5 134,235	–	–	–	–	–	2245,885
Ветка №8	7 11 241,78	5,5 20,5 354,035	7,5 5 117,75	5,5 38,5 664,895	6,5 13 265,33	5 16 251,2	6 8 150,72	4,5 22 310,86	–	2356,57
										17284,13

Таблица Б.6 – Расчет площади испарения для веток березы (навеска №6)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$
Ветка №1	5,5 15,5 267,685	5 30 471	4,5 57 805,41	5 43 675,1	–	–	–	–	–	2219,195
Ветка №2	5 21 329,7	6,5 4,5 91,845	5 28,5 447,45	6 5 94,2	5 62,5 981,25	6 3,5 65,94	5,5 19 328,13	–	–	2338,515
Ветка №3	4 38,5 483,56	4,5 43 607,59	5,5 4,5 77,715	4,5 43 607,59	6 11,5 216,66	–	–	–	–	1993,115
Ветка №4	4 57 715,92	5,5 5 86,35	4,5 29 409,77	5 4,5 70,65	4,5 25 353,25	5 22,5 353,25	–	–	–	1989,19
Ветка №5	4,5 41,5 586,395	5,5 4 69,08	4 32 401,92	5 4,5 70,65	4 34 427,04	5,5 4 69,08	4 24 301,44	–	–	1925,605
Ветка №6	5 15 235,5	6,5 5,5 112,255	5 36,5 573,05	7 6 131,88	5 35 549,5	6,5 5,5 112,255	5 37 580,9	–	–	2295,34
Ветка №7	5 19 298,3	6 6,5 122,46	4,5 18 254,34	6,5 7 142,87	4 54,5 684,52	6 6,5 122,46	4 37 464,72	–	–	2089,67
Ветка №8	4,5 28,5 402,705	6,5 6 122,46	4 24,5 307,72	5,5 6 103,62	4 42 527,52	5,5 6 103,62	4,5 33 466,29	–	–	2033,935
										16884,565

Таблица Б.7 – Расчет площади испарения для веток березы (навеска №7)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$
Ветка №1	5 14 219,8	4,5 104 1469,52	5,5 4 69,08	3,5 20,5 225,295	–	–	–	–	–	1983,695
Ветка №2	4,5 29,5 416,835	5,5 5 86,35	4,5 20 282,6	5 5,5 86,35	4 19 238,64	5,5 3,5 60,445	3,5 17 186,83	4,5 6,5 91,845	3,5 20 219,8	1669,695
Ветка №3	4 17 213,52	5 4 62,8	4 40 502,4	5,5 6 103,62	4 32,5 408,2	5,5 6,5 112,255	4 37 464,72	–	–	1867,515
Ветка №4	4 23,5 295,16	6 4,5 84,78	4 26,5 332,84	5 3,5 54,95	4 27,5 345,4	6,5 4,5 91,845	3,5 23,5 258,265	4,5 4,5 63,585	3,5 26 285,74	1812,565
Ветка №5	4 17,5 219,8	5 3 47,1	4 32,5 408,2	5 3,5 54,95	4 55,5 697,08	4,5 24,5 346,185	–	–	–	1773,315
Ветка №6	4,5 12 169,56	6 4 75,36	4 25 314	6,5 4 81,64	4 28 351,68	5,5 5 86,35	4 24,5 307,72	5,5 4 69,08	3,5 39,5 434,105	1889,495
Ветка №7	4 19,5 244,92	6,5 4 81,64	4 14,5 182,12	6 5 94,2	4,5 25 353,25	4 73,5 923,16	–	–	–	1879,29
Ветка №8	4,5 12 169,56	5,5 3,5 60,445	4,5 36 508,68	4 46 577,76	5,5 3 51,81	4 28,5 357,96	5,5 4 69,08	4 15,5 194,68	–	1989,975
Ветка №9	4 21,5 270,04	5,5 3 51,81	4 17,5 219,8	5 4 62,8	4 31 389,36	4,5 6 84,78	4 64,5 810,12	–	–	1888,71
										16754,255

Таблица Б.8 – Расчет площади испарения для веток березы (навеска №8)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$
Ветка №1	6 13,5 254,34	7,5 7 164,85	6 23 433,32	7,5 6 141,3	6 20 376,8	8,5 6,5 173,485	6,5 32,5 663,325	7 32,5 714,35	–	2921,77
Ветка №2	4 33 414,48	6 4,5 84,78	4 16 200,96	5,5 5,5 94,985	4 21,5 270,04	7 6,5 142,87	4 14 175,84	5,5 6 103,62	4 40 502,4	1989,975
Ветка №3	4 9 113,04	6 4,5 84,78	3,5 42 461,58	5,5 4 69,08	3,5 36 395,64	6 4,5 84,78	3 35 329,7	4 9 113,04	–	1651,64
Ветка №4	4 13 163,28	5,5 4 69,08	4 25 314	4,5 4 56,52	4 23,5 295,16	5 5 78,5	3,5 27 296,73	6 5 94,2	4 31 389,36	1756,83
Ветка №5	3,5 21 230,79	5 3 47,1	3,5 23 252,77	5 3,5 54,95	4 25 314	5 4 62,8	4 23 288,88	5 3,5 54,95	4 39,5 496,12	1802,36
Ветка №6	4,5 20,5 289,665	6,5 5,5 112,255	4,5 32,5 459,225	6,5 5 102,05	4,5 41,5 586,395	7 5,5 120,89	4,5 31,5 445,095	–	–	2115,575
Ветка №7	3 12 113,04	3,5 29 318,71	4,5 5 70,65	3,5 45 494,55	4 25 314	5,5 6,5 112,255	3,5 23 252,77	–	–	1675,975
Ветка №8	4 13 163,28	4,5 6 84,78	4 57 715,92	5 4 62,8	4 27 339,12	5 5 78,5	3,5 32,5 357,175	–	–	1801,575
										15715,7

Таблица Б.9 – Расчет площади испарения для веток березы (навеска №9)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$	
Ветка №1	5,5 24,5 423,115	6,5 4,5 91,845	5 24 376,8	6,5 6 122,46	4,5 24 339,12	6,5 3 61,23	4,5 23 324,99	6,5 6 122,46			2179,945
Ветка №2	3,5 13 142,87	5 4 62,8	4 32 401,92	5 4 62,8	4 25 314	4,5 4 56,52	4 56,5 709,64	4,5 5,5 77,715			1828,265
Ветка №3	3 21 197,82	4,5 4 56,52	3,5 15,5 170,345	4 4 50,24	3,5 18 197,82	4 68 854,08	5 12,5 196,25	–	–		1723,075
Ветка №4	5 7 109,9	6,5 4,5 91,845	4,5 22,5 317,925	5,5 4,5 77,715	4 29,5 370,52	6 6 113,04	4 28 351,68	4,5 3 42,39	4 39 489,84		1964,855
Ветка №5	5 18 282,6	4 53 665,68	5,5 3,5 60,445	4 26 326,56	4,5 3,5 49,455	4 35 439,6	5 7,5 117,75	–	–		1942,09
Ветка №6	5 19 298,3	5,5 51 880,77	6,5 4 81,64	5,5 60,5 1044,835	7 7,5 164,85	6 5 94,2	–	–	–		2564,595
Ветка №7	5 20 314	6,5 7,5 153,075	5 45 706,5	6,5 5,5 112,255	5 44 690,8	7 5 109,9	4,5 21 296,73	–	–		2383,26
Ветка №8	5 28,5 447,45	7 5 109,9	5,5 19 328,13	6,5 4 81,64	5,5 17 293,59	8,5 10 266,9	5,5 27 466,29	6,5 4 81,64	6 31 584,04		2659,58
											17245,665

Таблица Б.10 – Расчет площади испарения для веток березы (навеска №10)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$	
Ветка №1	4,5 34 480,42	7 4 87,92	4,5 31,5 445,095	6 3,5 65,94	4,5 26,5 374,445	7,5 4,5 105,975	4,5 20 282,6	6 3 56,52	4,5 18,5 261,405		2160,32
Ветка №2	3,5 18 197,82	5,5 4 69,08	3,5 64 703,36	5,5 7 120,89	4 15 188,4	6 3,5 65,94	4 15 188,4	6,5 5,5 112,255	4 16 200,96		1847,105
Ветка №3	4 24 301,44	5,5 3 51,81	4 26,5 332,84	5,5 3 51,81	3,5 25 274,75	5 4,5 70,65	3,5 23 252,77	5,5 6 103,62	3,5 32 351,68		1791,37
Ветка №4	4,5 32,5 459,225	6 4 75,36	4,5 30,5 430,965	6,5 5,5 112,255	4,5 28 395,64	5,5 3 51,81	4,5 32 452,16	6,5 4,5 91,845	5 8 125,6		2194,86
Ветка №5	5 49 769,3	7 5 109,9	4,5 47 664,11	5,5 3 51,81	4,5 22,5 317,925	6,5 4 81,64	5 16 251,2	–	–		2245,885
Ветка №6	4,5 40 565,2	8 7 175,84	5 35,5 557,35	7 11 241,78	5 34 533,8	6 4,5 84,78	5 14,5 227,65	–	–		2386,4
Ветка №7	4,5 33 466,29	5,5 3 51,81	4 22,5 282,6	4,5 6,5 91,845	4 22,5 282,6	5,5 4 69,08	3,5 24 263,76	4 5 62,8	3,5 27,5 302,225		1873,01
Ветка №8	4,5 13,5 190,755	7 5 109,9	4 51,5 646,84	6 5 94,2	4 24 301,44	7 7 153,86	4 41,5 521,24	–	–		2018,235
											16517,185

Таблица Б.11 – Расчет площади испарения для веток березы (навеска №11)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$
Ветка №1	5 34 533,8	8 5,5 138,16	5 47 737,9	4,5 37 522,81	6,5 4 81,64	4,5 8,5 120,105	–	–	–	2084,96
Ветка №2	4 50,5 634,28	4,5 3 42,39	4 29,5 370,52	5 3 47,1	3,5 28,5 313,215	4 2,5 31,4	3,5 25,5 280,245	4,5 4,5 63,585	–	1991,545
Ветка №3	5,5 23,5 405,845	7 5 109,9	5,5 44 759,88	6 7 131,88	5 20 314	6,5 6,5 132,665	4,5 21 296,73	5,5 5,5 94,985	4,5 16,5 233,145	2322,815
Ветка №4	4,5 16 226,08	6 5 94,2	4,5 4 56,52	6,5 6,5 132,665	4,5 59,5 840,735	5,5 4 69,08	4,5 19 268,47	5,5 3,5 60,445	4 26 326,56	1833,76
Ветка №5	5 10 157	4 26 326,56	6 13 244,92	4 24 301,44	5,5 4 69,08	4 49,5 621,72	6 5 94,2	3,5 12 131,88	–	2262,37
Ветка №6	5 27 423,9	4,5 37,5 529,875	5 4 62,8	4,5 27 381,51	5,5 3 51,81	4,5 29 409,77	5 4 62,8	4,5 14,5 204,885	–	1889,495
Ветка №7	3,5 18 197,82	4,5 4 56,52	3,5 40 439,6	5 5 78,5	3,5 56,5 620,935	5,5 6,5 112,255	4 15,5 194,68	–	–	1694,815
Ветка №8	5,5 18 310,86	6 24,5 461,58	6,5 4 81,64	5 53 832,1	6,5 3 61,23	5,5 22,5 388,575	7 7 153,86	5 11,5 180,55	–	1941,305
										16021,065

Таблица Б.12 – Расчет площади испарения для веток березы (навеска №12)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$
Ветка №1	4,5 18 254,34	6,5 4,5 91,845	4,5 28,5 402,705	5,5 4 69,08	4,5 30,5 430,965	6,5 4,5 91,845	4,5 28 395,64	5 9 141,3	5,5 12 207,24	2084,96
Ветка №2	3,5 25 274,75	5 4,5 70,65	4 24 301,44	5,5 5 86,35	4,5 22 310,86	6 3,5 65,94	4,5 18,5 261,405	5,5 4 69,08	4,5 39 551,07	1991,545
Ветка №3	5 1 282,6	7 3 65,94	5 25 392,5	6,5 6 122,46	4,5 15,5 219,015	6 5 94,2	4,5 26 367,38	6 8 150,72	5 40 628	2322,815
Ветка №4	4 5,5 69,08	7,5 4 94,2	4,5 32 452,16	4 19,5 244,92	6 5 94,2	3,5 80 879,2	–	–	–	1833,76
Ветка №5	5 20 314	5,5 6 103,62	5 45 706,5	5,5 5 86,35	5 18 282,6	6 5,5 103,62	4,5 16 226,08	7 6,5 142,87	4,5 21 296,73	2262,37
Ветка №6	3,5 15 164,85	6 5 94,2	4 19,5 244,92	4,5 4,5 63,585	3,5 20 219,8	6 4 75,36	4 25 314	5 4 62,8	4,5 46 649,98	1889,495
Ветка №7	3,5 24 263,76	5 5,5 86,35	3,5 35,5 390,145	5 5 78,5	3,5 38 417,62	4 36,5 458,44	–	–	–	1694,815
Ветка №8	4 22 276,32	6 4,5 84,78	4 28,5 357,96	6 5 94,2	4 16 200,96	5,5 5,5 94,985	4 21 263,76	5 5 78,5	4 39 489,84	1941,305
										16021,065

Таблица Б.13 – Расчет площади испарения для веток липы (навеска №1)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$
Ветка №1	5 47 737,9	6,5 5,5 112,255	5 60 942	6,5 5,5 112,255	4,5 24 339,12	–	–	–	–	2243,53
Ветка №2	4 63,5 797,56	5 5 78,5	4 44,5 558,92	6 9 169,56	4,5 24 339,12	–	–	–	–	1943,66
Ветка №3	6 20 376,8	7 6 131,88	5,5 48 828,96	6,5 7,5 153,075	5,5 60 1036,2	–	–	–	–	2526,915
Ветка №4	4 27 339,12	5 5 78,5	4,5 51,5 727,695	5,5 7,5 129,525	5 40 628	5,5 12 207,24	–	–	–	2110,08
Ветка №5	3,5 20 219,8	3 31 292,02	4 3,5 43,96	3 45 423,9	4 6,5 81,64	2,5 42 329,7	–	–	–	1391,02
Ветка №6	5 46 722,2	6,5 7 142,87	4,5 74 1045,62	7 6 131,88	4,5 14 197,82	–	–	–	–	2240,39
Ветка №7	4 31,5 395,64	5,5 6,5 112,255	4,5 52 734,76	5,5 6,5 112,255	4,5 27 381,51	5 22,5 353,25	–	–	–	2089,67
Ветка №8	3 15,5 146,01	5,5 6,5 112,255	3,5 51,5 565,985	5 5 78,5	3,5 47 516,53	4,5 6 84,78	4 16 200,96	–	–	1705,02
										16250,285

Таблица Б.14 – Расчет площади испарения для веток липы (навеска №2)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$
Ветка №1	4 34 427,04	5,5 6 103,62	4,5 38 536,94	5,5 6 103,62	5 41 643,7	5,5 21 362,67	–	–	–	2177,59
Ветка №2	5 19 298,3	4,5 49 692,37	7,5 9,5 223,725	5,5 61 1053,47	–	–	–	–	–	2267,865
Ветка №3	3,5 41,5 456,085	5 6 94,2	4 45 565,2	5,5 5,5 94,985	4 19 238,64	4,5 28,5 402,705	–	–	–	1851,815
Ветка №4	3,5 45 494,55	5 5 78,5	4 59 741,04	6 8 150,72	4,5 27 381,51	–	–	–	–	1846,32
Ветка №5	5 23 361,1	7 5,5 120,89	5,5 40 690,8	6 24 452,16	7 8 175,84	6 48 904,32	–	–	–	2705,11
Ветка №6	4,5 41 579,33	4 30 376,8	3,5 29 318,71	5,5 8,5 146,795	3,5 37 406,63	–	–	–	–	1828,265
Ветка №7	3,5 30 329,7	6 5 94,2	4 43,5 546,36	6 6 113,04	4 56,5 709,64	6 4,5 84,78	–	–	–	1877,72
Ветка №8	5,5 22 379,94	5 33 518,1	5,5 5 86,35	4,5 27 381,51	5,5 4 69,08	4,5 36 508,68	4 18 226,08	–	–	2169,74
										16724,425

Таблица Б.15 – Расчет площади испарения для веток липы (навеска №3)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$
Ветка №1	4 22,5 282,6	5 6 94,2	3,5 55 604,45	4,5 5,5 77,715	3 38,5 362,67	4 5,5 69,08	2 12 75,36	–	–	1566,075
Ветка №2	6 8 150,72	5 53,5 839,95	5,5 5,5 94,985	4,5 51 720,63	5,5 4,5 77,715	4,5 25 353,25				2237,25
Ветка №3	3,5 46 505,54	5 5,5 86,35	3 69 649,98	5,5 8 138,16	3 20,5 193,11	–	–	–	–	1573,14
Ветка №4	4 58 728,48	5,5 5 86,35	3,5 73,5 807,765	5 6 94,2	–	–	–	–	–	1716,795
Ветка №5	4,5 47,5 671,175	6 5,5 103,62	4,5 50 706,5	6 5,5 103,62	5,5 37,5 647,625	–	–	–	–	2232,54
Ветка №6	3,5 37 406,63	5 5,5 86,35	4 56 703,36	5,5 5,5 94,985	4,5 34 480,42	5,5 7 120,89	–	–	–	1892,635
Ветка №7	6,5 11 224,51	6 4,5 84,78	5 43 675,1	6 5 94,2	5 41 643,7	6 5 94,2	4,5 37 522,81	–	–	2339,3
Ветка №8	5 81 1271,7	6 5 94,2	5,5 53 915,31	–	–	–	–	–	–	2281,21
										15838,945

Таблица Б.16 – Расчет площади испарения для веток липы (навеска №4)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$
Ветка №1	5,5 61,5 1062,105	6,5 5 102,05	6 41,5 781,86	7 6 131,88	6,5 29 591,89	–	–	–	–	2669,785
Ветка №2	6 7 131,88	5 74,5 1169,65	7,5 6,5 153,075	5,5 53,5 923,945	–	–	–	–	–	2378,55
Ветка №3	4 10 125,6	4,5 47 664,11	5,5 5,5 94,985	4,5 38,5 544,005	5,5 5 86,35	5 29 455,3	5,5 13 224,51	–	–	2194,86
Ветка №4	5,5 8,5 146,795	5 61,5 965,55	5,5 7 120,89	4,5 62 876,06	6 7 131,88	–	–	–	–	2241,175
Ветка №5	7 6 131,88	6 39 734,76	7,5 6,5 153,075	6 44 828,96	7 8 175,84	5,5 39 673,53	7,5 5 117,75			2815,795
Ветка №6	5 70 1099	7 9 197,82	5,5 53 915,31	6 16,5 310,86	–	–	–	–	–	2522,99
Ветка №7	5 38 596,6	4,5 50,5 713,565	5,5 6 103,62	4 54,5 684,52	–	–	–	–	–	2098,305
Ветка №8	4,5 18,5 261,405	4 36 452,16	4,5 31 438,03	4 22 276,32	4,5 14 197,82	5 26 408,2	–	–	–	2033,935
										18955,395

Таблица Б.17 – Расчет площади испарения для веток липы (навеска №5)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$
Ветка №1	6 74,5 1403,58	7,5 7 164,85	6,5 67 1367,47	–	–	–	–	–	–	2935,9
Ветка №2	4 7 87,92	5,5 6 103,62	4 84 1055,04	6,5 7 142,87	4,5 44 621,72	–	–	–	–	2011,17
Ветка №3	5,5 10,5 181,335	7,5 8 188,4	6 60 1130,4	6,5 27 551,07	7 39 857,22	–	–	–	–	2908,425
Ветка №4	3,5 55 604,45	5,5 7 120,89	4 48 602,88	6 6,5 122,46	5 32 502,4	–	–	–	–	1953,08
Ветка №5	6 20 376,8	7 6 131,88	5 45 706,5	6,5 6 122,46	5 56 879,2	5 109,9	7 10 157	–	–	2483,74
Ветка №6	5,5 4 69,08	5 78,5 1232,45	6 6 113,04	5 59 926,3	–	–	–	–	–	2340,87
Ветка №7	4,5 12 169,56	4 49 615,44	3,5 62 681,38	5 5 78,5	3,5 19 208,81	–	–	–	–	1753,69
Ветка №8	3 70 659,4	5 8 125,6	3,5 57 626,43	5 3 47,1	–	–	–	–	–	1458,53
										17845,405

Таблица Б.18 – Расчет площади испарения для веток липы (навеска №6)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$
Ветка №1	4,5 41 579,33	5 12,5 196,25	4,5 37,5 529,875	6 7 131,88	4 22 276,32	4,5 23,5 332,055	–	–	–	2045,71
Ветка №2	5,5 72 1243,44	7 4 87,92	6 27,5 518,1	6,5 8 163,28	6 33 621,72	–	–	–	–	2634,46
Ветка №3	4 44 552,64	5 3 47,1	4 32 401,92	5,5 4,5 77,715	5 22,5 353,25	7,5 12 282,6	5,5 29,5 509,465	–	–	2224,69
Ветка №4	4,5 48,5 685,305	5,5 4 69,08	4 54 678,24	5,5 4 69,08	3,5 33 362,67	–	–	–	–	1864,375
Ветка №5	3,5 40,5 445,095	5 7 109,9	4 35,5 445,88	5 4,5 70,65	4 27,5 345,4	5 4 62,8	4,5 21 296,73	6 4 75,36	–	1851,815
Ветка №6	5,5 58,5 1010,295	6 5 94,2	5 76 1193,2	5,5 4 69,08	–	–	–	–	–	2366,775
Ветка №7	5 9,5 149,15	6,5 5 102,05	5 80 1256	6 5 94,2	5,5 43,5 751,245	–	–	–	–	2352,645
Ветка №8	6 24,5 461,58	7 4 87,92	6 31,5 593,46	8,5 6 160,14	5,5 35,5 613,085	7 5 109,9	6 11,5 216,66	8,5 8 213,52	4,5 20 282,6	2738,865
										18079,335

Таблица Б.19 – Расчет площади испарения для веток липы (навеска №7)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$	
Ветка №1	5 5,5 86,35	4 25 314	3,5 18 197,82	4 23 288,88	4,5 5,5 77,715	4 35,5 445,88	5,5 4,5 77,715	4,5 30 423,9	–	–	1912,26
Ветка №2	5,5 54 932,58	5 30 471	6,5 5 102,05	5 37,5 588,75	6,5 6,5 132,665	5 13 204,1	–	–	–	–	2431,145
Ветка №3	4 17 213,52	5,5 6 103,62	3,5 45 494,55	5,5 6 103,62	3,5 28,5 313,215	5 5,5 86,35	3 38 357,96	–	–	–	1672,835
Ветка №4	5 17 266,9	6,5 5 102,05	4,5 51 720,63	6,5 6 122,46	4,5 27,5 388,575	7 6,5 142,87	4,5 28 395,64	–	–	–	2139,125
Ветка №5	4 26 326,56	5 5,5 86,35	4 50 628	5 4,5 70,65	3,5 57 626,43	4,5 4,5 63,585	–	–	–	–	1801,575
Ветка №6	5,5 7,5 129,525	5 82 1287,4	6 5,5 103,62	4,5 51,5 727,695	–	–	–	–	–	–	2248,24
Ветка №7	5,5 7 120,89	3,5 41 450,59	5 5 78,5	3 43,5 409,77	5 6 94,2	3 36 339,12	4,5 7 98,91	–	–	–	1591,98
Ветка №8	5 14 219,8	5,5 7 120,89	4,5 86 1215,18	5,5 7 120,89	4 32 401,92	–	–	–	–	–	2078,68
											15875,84

Таблица Б.20 – Расчет площади испарения для веток липы (навеска №8)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$	
Ветка №1	4 37 464,72	6 7 131,88	4,5 54 763,02	6,5 7 142,87	5 42 659,4	–	–	–	–	–	2161,89
Ветка №2	4 26 326,56	6 5 94,2	4,5 47 664,11	5,5 7 120,89	5 29 455,3	6,5 5 102,05	5,5 17 293,59	6,5 9,5 193,895	–	–	2250,595
Ветка №3	4 38 477,28	6,5 7 142,87	4,5 19 268,47	6 6 113,04	4,5 26,5 374,445	7 6,5 142,87	3,5 44 483,56	–	–	–	2002,535
Ветка №4	4,5 16,5 233,145	4 39 489,84	3,5 50 549,5	3 39 367,38	–	–	–	–	–	–	1639,865
Ветка №5	4,5 17 240,21	4 39 489,84	3,5 50 549,5	3 39 367,38	–	–	–	–	–	–	1646,93
Ветка №6	4 44 552,64	5 5 78,5	4 61,5 772,44	6 6,5 122,46	3,5 25 274,75	–	–	–	–	–	1800,79
Ветка №7	4 36,5 458,44	6 5 94,2	4 30 376,8	5,5 5 86,35	3,5 40 439,6	3 30 282,6	–	–	–	–	1737,99
Ветка №8	4,5 24 339,12	5,5 4,5 77,715	3,5 40 439,6	4,5 5 70,65	3 46,5 438,03	5 4 62,8	3 23,5 221,37	–	–	–	1649,285
											14889,88

Таблица Б.21 – Расчет площади испарения для веток липы (навеска №9)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	ΣS , мм ²
Ветка №1	4 13 163,28	3,5 44 483,56	4,5 5 70,65	3,5 36 395,64	7 4 87,92	3,5 28 307,72	–	–	–	1508,77
Ветка №2	4,5 9,5 134,235	4 17 213,52	4,5 4,5 63,585	3,5 33 362,67	4,5 5,5 77,715	3,5 42 461,58	4 5 62,8	3 28,5 268,47	–	1644,575
Ветка №3	4 26,5 332,84	5 4,5 70,65	4 46 577,76	5,5 4,5 77,715	3 51 480,42	4 4,5 56,52	–	–	–	1595,905
Ветка №4	3 62 584,04	4 6,5 81,64	3,5 46 505,54	4,5 4,5 63,585	4 25,5 320,28	–	–	–	–	1555,085
Ветка №5	4,5 61,5 868,995	6 4 75,36	3,5 54 593,46	5 6 94,2	3,5 17 186,83	–	–	–	–	1818,845
Ветка №6	6 11 207,24	5,5 21 362,67	5 26,5 416,05	6 5 94,2	4,5 32 452,16	6 5 94,2	4,5 31 438,03	4 15 188,4	–	2252,95
Ветка №7	4 52,5 659,4	5 7,5 117,75	4,5 60 847,8	5 25,5 400,35	–	–	–	–	–	2025,3
Ветка №8	6 25 471	7,5 5,5 129,525	6,5 58 1183,78	8 5 125,6	6,5 38 775,58	7 14 307,72	–	–	–	2993,205
										15394,635

Таблица Б.22 – Расчет площади испарения для веток липы (навеска №10)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	ΣS , мм ²
Ветка №1	4,5 26,5 374,445	6,5 6 122,46	4,5 46,5 657,045	5,5 4,5 77,715	4 60 753,6	–	–	–	–	1985,265
Ветка №2	4,5 3,5 49,455	3,5 53 582,47	5 6,5 102,05	4 32,5 408,2	5,5 5 86,35	4 36,5 458,44	6 4 75,36	5 4,5 70,65	–	1832,975
Ветка №3	5,5 38,5 664,895	6,5 4 81,64	5 42,5 667,25	7 4,5 98,91	4,5 54 763,02	–	–	–	–	2275,715
Ветка №4	6,5 3 61,23	5 59 926,3	7,5 5 117,75	5,5 46,5 803,055	6,5 5 102,05	5,5 26 449,02	–	–	–	2459,405
Ветка №5	3 8,5 80,07	6,5 5,5 112,255	4 60 753,6	7 6 131,88	4,5 65 918,45	–	–	–	–	1996,255
Ветка №6	6,5 5 102,05	5 53 832,1	6,5 3,5 71,435	5,5 50 863,5	7 4,5 98,91	6 28 527,52	–	–	–	2495,515
Ветка №7	5,5 3 51,81	5 78 1224,6	6,5 5 102,05	5 58 910,6	–	–	–	–	–	2289,06
Ветка №8	5,5 3 51,81	4 96 1205,76	5 5 78,5	4 38 477,28	–	–	–	–	–	1813,35
										17147,54

Таблица Б.23 – Расчет площади испарения для веток липы (навеска №11)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$
Ветка №1	5,5 9 155,43	7,5 6 141,3	5,5 70 1208,9	6,5 5 102,05	5 55 863,5	–	–	–	–	2471,18
Ветка №2	4,5 65,5 925,515	5,5 4 69,08	4,5 73,5 1038,555	–	–	–	–	–	–	2033,15
Ветка №3	4,5 24 339,12	6 4,5 84,78	4,5 52,5 741,825	5,5 4,5 77,715	3,5 60 659,4	–	–	–	–	1902,84
Ветка №4	4 30 376,8	7 7 153,86	4,5 58 819,54	6,5 9 183,69	5 42 659,4	–	–	–	–	2193,29
Ветка №5	8 7,5 188,4	5,5 42,5 733,975	7 5 109,9	5,5 14,5 250,415	8 6,5 163,28	5,5 28 483,56	7,5 9 211,95	4,5 32,5 459,225	–	2600,705
Ветка №6	4,5 17 240,21	7,5 5,5 129,525	4,5 76 1073,88	6,5 6,5 132,665	4,5 28 395,64	5,5 14,5 250,415	–	–	–	2222,335
Ветка №7	5,5 49,5 854,865	7,5 5,5 129,525	5 32 502,4	6 3,5 65,94	4,5 55 777,15	–	–	–	–	2329,88
Ветка №8	3,5 31 340,69	5,5 6 103,62	4 28 351,68	6,5 5 102,05	4,5 25 353,25	5,5 6 103,62	5 25 392,5	6,5 3 61,23	5 17 266,9	2075,54
										17828,92

Таблица Б.24 – Расчет площади испарения для веток липы (навеска №12)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$
Ветка №1	5,5 27 466,29	6,5 5,5 112,255	5 41 643,7	5,5 5,5 94,985	4,5 34 480,42	6 6 113,04	5 26,5 416,05	–	–	2326,74
Ветка №2	5 36,5 573,05	6,5 5 102,05	5 81 1271,7	6,5 4 81,64	5,5 19 328,13	–	–	–	–	2356,57
Ветка №3	4,5 17 240,21	7,5 10 235,5	5,5 49 846,23	7,5 7,5 176,625	5,5 33 569,91	7 5 109,9	6 22 414,48	–	–	2592,855
Ветка №4	4,5 50 706,5	6,5 4,5 91,845	5,5 88 1519,76	–	–	–	–	–	–	2318,105
Ветка №5	5 32 502,4	6,5 4,5 91,845	4 49 615,44	5,5 4 69,08	3,5 57 626,43	–	–	–	–	1905,195
Ветка №6	4,5 19,5 275,535	7 5,5 120,89	5 27 423,9	7,5 9,5 223,725	5 17 266,9	7 6,5 142,87	5 30 471	6,5 7,5 153,075	5 26,5 416,05	2493,945
Ветка №7	6 32 602,88	7,5 6,5 153,075	5,5 73,5 1269,345	8 7 175,84	5 25,5 400,35	–	–	–	–	2601,49
Ветка №8	4,5 16 226,08	6,5 5,5 112,255	5 78 1224,6	6,5 5,5 112,255	5,5 37,5 647,625	–	–	–	–	2322,815
										18917,715

Таблица Б.25 – Расчет площади испарения для веток тополя (навеска №1)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$
Ветка №1	7,5 9 211,95	5 20 314	6,5 113 2306,33	–	–	–	–	–	–	2832,28
Ветка №2	6 35 659,4	6,5 9 183,69	5 65 1020,5	4,5 32,5 459,225	–	–	–	–	–	2322,815
Ветка №3	5 12,5 196,25	4,5 20,5 289,665	5,5 20 345,4	4,5 24,5 346,185	5,5 18,5 319,495	6 5 94,2	4 22 276,32	5,5 22,5 388,575	–	2256,09
Ветка №4	5 14,5 227,65	5,5 5 86,35	4,5 10 141,3	5 11 172,7	5,5 30,5 526,735	5 10,5 164,85	5,5 44 759,88	6 22,5 423,9	–	2503,365
Ветка №5	4,5 23 324,99	5,5 36 621,72	5 32 502,4	4,5 34,5 487,485	5 23,5 368,95	–	–	–	–	2305,545
Ветка №6	6,5 17,5 357,175	6 18 339,12	8 5 125,6	6 25,5 480,42	7,5 5 117,75	6 22,5 423,9	8,5 16 427,04	6,5 13 265,33	7 19,5 428,61	2964,945
Ветка №7	7 51 1120,98	7,5 6 141,3	6,5 45,5 928,655	7 5 109,9	6,5 38,5 785,785	–	–	–	–	3086,62
Ветка №8	4 32 401,92	5 6,5 102,05	4 47 590,32	5 5 78,5	4 39 489,84	5 20 314	–	–	–	1976,63
										20248,29

Таблица Б.26 – Расчет площади испарения для веток тополя (навеска №2)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$
Ветка №1	6 19,5 367,38	5,5 39 673,53	8 8,5 213,52	6 30 565,2	6,5 21,5 438,815	5,5 18,5 319,495	–	–	–	2577,94
Ветка №2	5 14 219,8	7 17 373,66	5 22 345,4	4,5 54,5 770,085	4 18 226,08	4,5 15 211,95	–	–	–	2146,975
Ветка №3	6 6 113,04	4 18 226,08	5 54 847,8	7,5 21 494,55	5 20 314	4,5 22 310,86	–	–	–	2306,33
Ветка №4	6,5 8,5 173,485	4 33,5 420,76	3,5 37 406,63	5,5 5,5 94,985	4 16,5 207,24	5,5 5 86,35	4 10,5 131,88	5 23,5 368,95	–	1890,28
Ветка №5	5,5 22,5 388,575	6 5 94,2	5,5 21 362,67	6,5 14,5 295,945	5,5 59 1018,93	6,5 6,5 132,665	6 20 376,8	–	–	2669,785
Ветка №6	6,5 30,5 622,505	6 16,5 310,86	7,5 8,5 200,175	5 18,5 290,45	5,5 42 725,34	6 5 94,2	5 19 298,3	–	–	2541,83
Ветка №7	5,5 12,5 215,875	5 35 549,5	5,5 5 86,35	4 32 401,92	5 5,5 86,35	4 23 288,88	5,5 4,5 77,715	4,5 22,5 317,925	5,5 10,5 181,335	2205,85
Ветка №8	6,5 15 306,15	6 32,5 612,3	7 5 109,9	5,5 44,5 768,515	6 5,5 103,62	5,5 41,5 716,705	–	–	–	2617,19
										18956,18

Таблица Б.27 – Расчет площади испарения для веток тополя (навеска №3)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$	
Ветка №1	4 9 113,04	5 15,5 243,35	5,5 18,5 319,495	4 30 376,8	4,5 6 84,78	4 28 351,68	4,5 7 98,91	3,5 31,5 346,185	–	–	1934,24
Ветка №2	3,5 38,5 423,115	4 22 276,32	4,5 11,5 162,495	5 34 533,8	5,5 4,5 77,715	4,5 31,5 445,095	–	–	–	–	1918,54
Ветка №3	4,5 6 84,78	5 44,5 698,65	6 5,5 103,62	5 15 235,5	5,5 4 69,08	4,5 15 211,95	6,5 4,5 91,845	5 22 345,4	4 27 339,12	–	2179,945
Ветка №4	8 24 602,88	6,5 8,5 173,485	7,5 5 117,75	6 28,5 536,94	8 6 150,72	6 15,5 292,02	8,5 6 160,14	6 27 508,68	6,5 20 408,2	–	2950,815
Ветка №5	5,5 31,5 544,005	7,5 6,5 153,075	5,5 23,5 405,845	7 5 109,9	5,5 44 759,88	6 8 150,72	5 17,5 274,75	5,5 14,5 250,415	–	–	2648,59
Ветка №6	4 17 213,52	5 3,5 54,95	4,5 36 508,68	5 39 612,3	5,5 5 86,35	4 19 238,64	5,5 3 51,81	5 23 361,1	–	–	2127,35
Ветка №7	4,5 16,5 233,145	5 3 47,1	4,5 32 452,16	5 4 62,8	4,5 52 734,76	5 3 47,1	4,5 17,5 247,275	5,5 16,5 284,955	–	–	2109,295
Ветка №8	6,5 21 428,61	6 65 1224,6	6,5 4 81,64	5 37 580,9	6 3,5 65,94	5,5 15 259,05	–	–	–	–	2640,74
											18509,515

Таблица Б.28 – Расчет площади испарения для веток тополя (навеска №4)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$	
Ветка №1	4,5 44 621,72	6,5 8 163,28	5 9 141,3	8 7,5 188,4	5 42 659,4	7 9,5 208,81	5,5 8 138,16	6,5 8 163,28	5,5 13 224,51	–	2508,86
Ветка №2	5 16,5 259,05	4,5 47 664,11	5 4,5 70,65	4 52 653,12	5 78,5 828,96	4,5 21,5 303,795	–	–	–	–	2029,225
Ветка №3	6,5 16,5 336,765	7,5 3 70,65	6 49 923,16	6,5 4 81,64	5,5 48 828,96	7 5 109,9	6 20,5 386,22	–	–	–	2737,295
Ветка №4	6 16,5 310,86	5,5 54 932,58	7 10 219,8	4,5 11 155,43	5 52,5 824,25	–	–	–	–	–	2442,92
Ветка №5	5 12,5 196,25	5,5 21 362,67	7 8 175,84	5 26,5 416,05	7 20 439,6	5 19,5 306,15	6,5 7,5 153,075	5 28 439,6	–	–	2489,235
Ветка №6	6 35 659,4	6,5 8 163,28	5 43,5 682,95	6 13,5 254,34	4,5 13 183,69	5,5 6,5 112,255	4 23,5 295,16	–	–	–	2351,075
Ветка №7	6,5 12,5 255,125	5,5 12 207,24	8 13,5 339,12	5,5 45,5 785,785	8,5 15 400,35	6 44,5 838,38	–	–	–	–	2826
Ветка №8	6 44,5 838,38	7 7,5 164,85	6 18,5 348,54	5,5 21,5 371,305	6,5 6 122,46	4,5 24,5 346,185	6,5 20,5 418,405	–	–	–	2610,125
											19994,735

Таблица Б.29 – Расчет площади испарения для веток тополя (навеска №5)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$	
Ветка №1	7 12 263,76	6 39 734,76	7 21,5 472,57	5 9,5 149,15	6,5 12,5 255,125	5,5 34 587,18	6 22 414,48	–	–	–	2877,025
Ветка №2	5 14 219,8	6 16 301,44	4,5 35,5 501,615	5,5 33,5 578,545	5 9,5 149,15	5,5 32,5 561,275	–	–	–	–	2311,825
Ветка №3	4 17 213,52	5 8 125,6	3,5 23,5 258,265	4,5 59 833,67	4 8 100,48	3 29 273,18	–	–	–	–	1804,715
Ветка №4	5,5 23,5 405,845	5 12,5 196,25	5,5 8 138,16	4 21 263,76	5,5 5,5 94,985	4 37 464,72	5 8 125,6	3,5 9,5 104,405	5 19 298,3	–	2092,025
Ветка №5	5 30 471	7,5 7,5 176,625	5,5 51 880,77	6 38,5 725,34	8,5 8,5 226,865	5,5 13 224,51	–	–	–	–	2705,11
Ветка №6	4 27 339,12	4,5 6,5 91,845	3,5 15 164,85	5 5 78,5	4,5 20 282,6	5,5 7 120,89	3,5 39,5 434,105	4 5,5 69,08	3 15,5 146,01	–	1727
Ветка №7	4 13 163,28	5 4,5 70,65	4 25 314	4,5 4 56,52	4 32 401,92	5 14 219,8	4 17 213,52	4,5 4 56,52	5 32 502,4	–	1998,61
Ветка №8	4,5 27 381,51	5 3,5 54,95	4,5 25,5 360,315	5 4,5 70,65	4,5 34,5487,485	5 3 47,1	4,5 49 692,37	–	–	–	2094,38
										17610,69	

Таблица Б.30 – Расчет площади испарения для веток тополя (навеска №6)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$	
Ветка №1	6 36,5 687,66	8 16 401,92	5,5 25 431,75	6,5 5,5 112,255	6 18 339,12	6,5 7 142,87	4,5 19 268,47	5,5 18 310,86	–	–	2694,905
Ветка №2	5,5 5 86,35	4,5 20 282,6	6 8,5 160,14	4 12 150,72	4,5 30 423,9	4 24 301,44	4,5 44 621,72	–	–	–	2026,87
Ветка №3	5,5 24 414,48	5 10 157	6 29,5 555,78	5,5 23 397,21	6 33,5 631,14	4,5 7 98,91	5,5 17,5 302,225	–	–	–	2556,745
Ветка №4	7 12 263,76	6 32,5 612,3	5,5 15,5 267,685	5 20 314	4,5 21 296,73	5 38 596,6	–	–	–	–	2351,075
Ветка №5	4 18,5 232,36	6,5 5,5 112,255	4,5 20,5 289,665	6,5 6 122,46	4,5 10 141,3	6,5 7,5 153,075	5,5 14,5 250,415	6 36 678,24	5 22 345,4	–	2325,17
Ветка №6	5 28 439,6	5,5 4 69,08	4,5 55,5 784,215	5 4 62,8	4 48 602,88	4,5 6,5 91,845	–	–	–	–	2050,42
Ветка №7	4,5 45 635,85	5 5 78,5	4,5 36,5 515,745	6 4,5 84,78	5,5 37,5 647,625	6 18 339,12	–	–	–	–	2301,62
Ветка №8	4,5 32 452,16	5 4 62,8	4,5 39,5 558,135	5,5 4 69,08	5 35 549,5	5,5 3,5 60,445	5 30,5 478,85	–	–	–	2230,97
										18537,775	

Таблица Б.31 – Расчет площади испарения для веток тополя (навеска №7)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$
Ветка №1	4,5 18 254,34	5 4 62,8	4 34 427,04	5 5 78,5	4 31,5 395,64	5 5 78,5	4 39,5 496,12	5,5 3 51,81	4 8 100,48	1945,23
Ветка №2	6 8 150,72	5,5 33 569,91	8 9,5 238,64	5,5 28 483,56	9 9 254,34	6 42 791,28	8 7,5 188,4	–	–	2676,85
Ветка №3	5,5 33 569,91	7 8 175,84	5,5 77 1329,79	8 8 200,96	5,5 21,5 371,305	–	–	–	–	2647,805
Ветка №4	5 9,5 149,15	6,5 4,5 91,845	5 29,5 463,15	6,5 6 122,46	5 38,5 604,45	7 7 153,86	6 14 263,76	7 7 153,86	6,5 27,5 561,275	2563,81
Ветка №5	6 17,5 329,7	6 24 452,16	7,5 5 117,75	5,5 27,5 474,925	7,5 6,5 153,075	5 32 502,4	7 7 153,86	4,5 23,5 332,055	–	2515,925
Ветка №6	7 17,5 384,65	6 70 1318,8	5 22 345,4	6,5 7 142,87	5 16,5 259,05	6,5 7,5 153,075	5 7 109,9	–	–	2713,745
Ветка №7	5 6,5 102,05	7 4 87,92	4 40 502,4	5 44,5 698,65	7 4,5 98,91	5,5 47 811,69	–	–	–	2301,62
Ветка №8	3,5 7 76,93	4,5 4 56,52	4 17 213,52	5,5 25 431,75	4 66,5 835,24	5 21 329,7	–	–	–	1943,66
										19308,645

Таблица Б.32 – Расчет площади испарения для веток тополя (навеска №8)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$
Ветка №1	6,5 17,5 357,175	10 7,5 235,5	6 40 753,6	9 8 226,08	6,5 46 938,86	8 26 653,12	–	–	–	3164,335
Ветка №2	6 30 565,2	5,5 15 259,05	5 20 314	6 4 75,36	5 34 533,8	6 3,5 65,94	5 41 643,7	–	–	2457,05
Ветка №3	6 37 697,08	5,5 3,5 60,445	5 33 518,1	5,5 3 51,81	5 27,5 431,75	6 4 75,36	5,5 42 725,34	–	–	2559,885
Ветка №4	3,5 12 131,88	5,5 5,5 94,985	4 8 100,48	5,5 4,5 77,715	5 9 141,3	6,5 18 367,38	8 18 452,16	6 68 1281,12	–	2647,02
Ветка №5	6,5 8 163,28	5 12,5 196,25	6 10,5 197,82	5,5 14,5 250,415	4 31 389,36	6,5 6 122,46	5,5 28,5 492,195	6 18 339,12	4 21 263,76	2414,66
Ветка №6	3,5 42 461,58	6 5,5 103,62	5 23 361,1	5,5 5,5 94,985	4 16 200,96	5,5 19 328,13	8 34 854,08	–	–	2404,455
Ветка №7	6 14,5 273,18	5,5 71,5 1234,805	5 9 141,3	6 15 282,6	5 21,5 337,55	–	–	–	–	2269,435
Ветка №8	5,5 38 656,26	6 15,5 292,02	6,5 24 489,84	6 13 244,92	6,5 26 530,66	7 26 571,48	–	–	–	2785,18
										20702,02

Таблица Б.33 – Расчет площади испарения для веток тополя (навеска №9)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$
Ветка №1	7,5 5 117,75	7 51 1120,98	7,5 4 94,2	7 48,5 1066,03	7,5 39 918,45	–	–	–	–	3317,41
Ветка №2	6 22,5 423,9	6,5 5 102,05	5,5 39 673,53	6,5 5 102,05	5 42 659,4	6,5 5,5 112,255	5,5 26,5 457,655	–	–	2530,84
Ветка №3	3,5 9 98,91	4 28 351,68	3,5 8,5 93,415	5 5,5 86,35	4,5 44 621,72	5 29,5 463,15	5,5 21,5 371,305	–	–	2086,53
Ветка №4	5 40 628	6,5 9 183,69	4,5 91 1285,83	–	–	–	–	–	–	2097,52
Ветка №5	7,5 15,5 365,025	6 28 527,52	7 6 131,88	6 27 508,68	6,5 38,5 785,785	9 5,5 155,43	6 17 320,28	7 8,5 186,83	–	2981,43
Ветка №6	4 31,5 395,64	5 7,5 117,75	4 46,5 584,04	4,5 5 70,65	4 7 87,92	5,5 22 379,94	4 10 125,6	3,5 15 164,85	–	1926,39
Ветка №7	4 20 251,2	4,5 5,5 77,715	4 7,5 94,2	4,5 32,5 459,225	6,5 16 326,56	5 26 408,2	6 18 339,12	5 16 251,2	–	2207,42
Ветка №8	4 35 439,6	5,5 12,5 215,875	4,5 20 282,6	5 11,5 180,55	4,5 12 169,56	6 7 131,88	4,5 12,5 176,625	5 6 94,2	4 27 339,12	2030,01
										19177,55

Таблица Б.34 – Расчет площади испарения для веток тополя (навеска №10)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$
Ветка №1	6,5 8,5 173,485	6 14,5 273,18	7 10 219,8	5 18 282,6	6,5 9 183,69	4 16,5 207,24	5,5 60 1036,2	4 8,5 106,76	–	2482,955
Ветка №2	6,5 31,5 642,915	5 53,5 839,95	4,5 49 692,37	3,5 9 98,91	–	–	–	–	–	2274,145
Ветка №3	3,5 10 109,9	5 6 94,2	4 10 125,6	5 5,5 86,35	4,5 6,5 91,845	5 64 1004,8	5,5 44 759,88	–	–	2272,575
Ветка №4	4,5 15 211,95	5,5 6,5 112,255	6 17 320,28	6,5 8 163,28	5,5 19,5 336,765	6 27 508,68	6,5 5,5 112,255	6 44,5 838,38	–	2603,845
Ветка №5	5 36,5 573,05	6 5,5 103,62	4,5 22 310,86	6 5,5 103,62	4,5 29,5 416,835	5,5 4,5 77,715	4,5 26,5 374,445	6,5 5 102,05	4,5 11,5 162,495	2224,69
Ветка №6	6 32 602,88	5,5 5 86,35	5 68,5 1075,45	5,5 4,5 77,715	5 38 596,6	–	–	–	–	2438,995
Ветка №7	6,5 5 102,05	4,5 68,5 967,905	6 4 75,36	5 50 785	6 22 414,48	–	–	–	–	2344,795
Ветка №8	6 24,5 461,58	6,5 5 102,05	6 43 810,12	6,5 6 122,46	6 48,5 913,74	7 17 373,66	–	–	–	2783,61
										19425,61

Таблица Б.35 – Расчет площади испарения для веток тополя (навеска №11)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$	
Ветка №1	3,5 22 241,78	4 5,5 69,08	3,5 18,5 203,315	5,5 18 310,86	4,5 32 452,16	5,5 5 86,35	3,5 17,5 192,325	4,5 20 282,6	–	–	1838,47
Ветка №2	5,5 11 189,97	5 8 125,6	5,5 5 86,35	5 27,5 431,75	5,5 7 120,89	4,5 22,5 317,925	6,5 7 142,87	4,5 55 777,15	–	–	2192,505
Ветка №3	6,5 10,5 214,305	5 37 580,9	5,5 10 172,7	5 23,5 368,95	4,5 44,5 628,785	4 18 226,08	–	–	–	–	2191,72
Ветка №4	5,5 21,5 371,305	6,5 7 142,87	5,5 17 293,59	6 7,5 141,3	5,5 30 518,1	6,5 8 163,28	5 23,5 368,95	6,5 5,5 112,255	6 24 452,16	–	2563,81
Ветка №5	4 24 301,44	4,5 5,5 77,715	4 30 376,8	5,5 46,5 803,055	4,5 15 211,95	5 20 314	–	–	–	–	2084,96
Ветка №6	5 15,5 243,35	4,5 39 551,07	5 5 78,5	4 20 251,2	7,5 5,5 129,525	4 25,5 320,28	5,5 5 86,35	4 25,5 320,28	–	–	1980,555
Ветка №7	5 19 298,3	5,5 4 69,08	5 29 455,3	5,5 3,5 60,445	5 22 345,4	5,5 4 69,08	5 20,5 321,85	6 45 847,8	–	–	2467,255
Ветка №8	5 35,5 557,35	6,5 5,5 112,255	4,5 32 452,16	6,5 7 142,87	5 38,5 604,45	5, 4,5 77,715	5 23 361,1	–	–	–	2307,9
										17627,175	

Таблица Б.36 – Расчет площади испарения для веток тополя (навеска №12)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma S, \text{мм}^2$	
Ветка №1	4 15 188,4	4,5 7 98,91	3,5 21,5 236,285	5 22 345,4	4 44 552,64	3,5 20 219,8	4 6,5 81,64	3 8 75,36	–	–	1798,435
Ветка №2	6 18 339,12	5,5 33,5 578,545	6,5 5,5 112,255	4,5 46 649,98	6,5 6,5 132,665	6 31,5 593,46	–	–	–	–	2406,025
Ветка №3	4 40,5 508,68	4,5 31 438,03	3,5 13 142,87	4,5 5 70,65	3,5 13 142,87	4 5 62,8	3,5 12,5 137,375	4 5,5 69,08	3 17 160,14	–	1732,495
Ветка №4	6 34 640,56	7 59 1296,82	9 6 169,56	7 13 285,74	3 34 320,28	–	–	–	–	–	2712,96
Ветка №5	6 15,5 292,02	5 14,5 227,65	5,5 4,5 77,715	4,5 16 226,08	5,5 5 86,35	4,5 21,5 303,795	6 5 94,2	4,5 36 508,68	5 27 423,9	–	2240,39
Ветка №6	6,5 8 163,28	5,5 41 708,07	6 4 75,36	5 40,5 635,85	6 5 94,2	5 34 533,8	6 6 113,04	4,5 7,5 105,975	–	–	2429,575
Ветка №7	4 7 87,92	5,5 4,5 77,715	4 63 791,28	5,5 5 86,35	4 45 565,2	5 4 62,8	4,5 17,5 247,275	–	–	–	1918,54
Ветка №8	6 9 169,56	7 5,5 120,89	5,5 37 638,99	6 4 75,36	5,5 45 777,15	6 6,5 122,46	5,5 42 725,34	–	–	–	2629,75
										17868,17	

Приложение В

Результаты расчета массовой скорости испарения

Таблица В.1 – Результаты расчёта массовой скорости испарения влаги для веток берёзы (Т=333 К)

τ, с	Измерение №1 (S = 0,0169 м ² , φ = 42,38 %)			Измерение №2 (S = 0,0178 м ² , φ = 41,50 %)			Измерение №3 (S = 0,0165 м ² , φ = 42,37 %)		
	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с
0	19,782			20,514			18,503		
600	19,100	0,682	6,736	19,902	0,612	5,728	17,850	0,653	6,596
1200	18,195	0,905	8,939	18,947	0,955	8,938	17,075	0,775	7,828
1800	17,566	0,629	6,213	18,235	0,712	6,664	16,535	0,540	5,454
2400	17,084	0,482	4,761	17,724	0,511	4,783	16,168	0,367	3,707
3000	16,475	0,609	6,015	17,302	0,422	3,950	15,831	0,337	3,404
3600	15,953	0,522	5,156	16,759	0,543	5,082	15,282	0,549	5,545
4200	15,590	0,363	3,585	16,279	0,480	4,493	14,815	0,467	4,717
4800	15,165	0,425	4,198	15,941	0,338	3,164	14,473	0,342	3,454
5400	14,705	0,460	4,543	15,585	0,356	3,332	14,205	0,268	2,707
6000	14,363	0,342	3,378	15,154	0,431	4,034	13,785	0,420	4,242
6600	14,129	0,234	2,311	14,826	0,328	3,070	13,398	0,387	3,909
7200	13,804	0,325	3,210	14,583	0,243	2,274	13,121	0,277	2,798
7800	13,510	0,294	2,904	14,258	0,325	3,042	12,924	0,197	1,990
8400	13,311	0,199	1,966	13,922	0,336	3,145	12,620	0,304	3,071
9000	13,138	0,173	1,709	13,676	0,246	2,302	12,330	0,290	2,929
9600	12,910	0,228	2,252	13,504	0,172	1,610	12,125	0,205	2,071
10200	12,743	0,167	1,649	13,260	0,244	2,284	11,993	0,132	1,333
10800	12,632	0,111	1,096	13,042	0,218	2,040	11,882	0,111	1,121
11400	12,497	0,135	1,333	12,900	0,142	1,329	11,648	0,234	2,364
12000	12,354	0,143	1,412	12,775	0,125	1,170	11,501	0,147	1,485
12600	12,250	0,104	1,027	12,604	0,171	1,600	11,413	0,088	0,889
13200	12,174	0,076	0,751	12,481	0,123	1,151	11,309	0,104	1,050
13800	12,074	0,100	0,988	12,405	0,076	0,711	11,194	0,115	1,162
14400	11,980	0,094	0,928	12,348	0,057	0,533	11,115	0,079	0,798
15000	11,919	0,061	0,602	12,254	0,094	0,880	11,063	0,052	0,525
15600	11,856	0,063	0,622	12,188	0,066	0,618	10,987	0,076	0,768
16200	11,788	0,068	0,672	12,149	0,039	0,365	10,926	0,061	0,616
16800	11,722	0,066	0,652	12,123	0,026	0,243	10,883	0,043	0,434
17400	11,681	0,041	0,405	12,077	0,046	0,431	10,839	0,044	0,444
18000	11,631	0,050	0,494	12,036	0,041	0,384	10,797	0,042	0,424
18600	11,573	0,058	0,573	12,010	0,026	0,243	10,761	0,036	0,364
19200	11,536	0,037	0,365	12,001	0,009	0,084	10,748	0,013	0,131
19800	11,455	0,081	0,800				10,714	0,034	0,343
20400	11,415	0,040	0,395				10,687	0,027	0,273
21000	11,398	0,017	0,168				10,664	0,023	0,232

Таблица В.2 – Результаты расчёта массовой скорости испарения влаги для веток берёзы ($T=353\text{ К}$)

$\tau, \text{ с}$	Измерение №1 ($S = 0,0161 \text{ м}^2, \varphi = 44,57\%$)			Измерение №2 ($S = 0,0173 \text{ м}^2, \varphi = 42,08\%$)			Измерение №3 ($S = 0,0169 \text{ м}^2, \varphi = 39,30\%$)		
	$m, \text{ г}$	$\Delta m, \text{ г}$	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5, \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{ с}$	$m, \text{ г}$	$\Delta m, \text{ г}$	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5, \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{ с}$	$m, \text{ г}$	$\Delta m, \text{ г}$	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5, \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{ с}$
0	19,281			19,477			17,604		
600	18,148	1,133	11,738	18,229	1,248	12,034	16,648	0,956	9,437
1200	16,684	1,464	15,168	16,713	1,516	14,618	15,433	1,215	11,993
1800	15,747	0,937	9,708	15,626	1,087	10,482	14,536	0,897	8,854
2400	14,712	1,035	10,723	14,448	1,178	11,359	13,561	0,975	9,624
3000	13,846	0,866	8,972	13,564	0,884	8,524	12,738	0,823	8,124
3600	13,266	0,580	6,009	12,933	0,631	6,085	12,216	0,522	5,153
4200	12,577	0,689	7,138	12,267	0,666	6,422	11,664	0,552	5,449
4800	12,095	0,482	4,994	11,901	0,366	3,529	11,298	0,366	3,613
5400	11,799	0,296	3,067	11,681	0,220	2,121	11,107	0,191	1,885
6000	11,426	0,373	3,864	11,504	0,177	1,707	10,934	0,173	1,708
6600	11,211	0,215	2,227	11,437	0,067	0,646	10,841	0,093	0,918
7200	11,080	0,131	1,357	11,392	0,045	0,434	10,797	0,044	0,434
7800	10,904	0,176	1,823	11,350	0,042	0,405	10,745	0,052	0,513
8400	10,814	0,090	0,932	11,336	0,014	0,135	10,714	0,031	0,306
9000	10,771	0,043	0,445	11,317	0,019	0,183	10,701	0,013	0,128
9600	10,737	0,034	0,352	11,294	0,023	0,222	10,685	0,016	0,158
10200	10,702	0,035	0,363	11,286	0,008	0,077			
10800	10,687	0,015	0,155	11,281	0,005	0,048			

Таблица В.3 – Результаты расчёта массовой скорости испарения влаги для веток берёзы (Т=373 К)

τ, c	Измерение №1 ($S = 0,0157 \text{ м}^2, \varphi = 44,79 \%$)			Измерение №2 ($S = 0,0172 \text{ м}^2, \varphi = 45,37 \%$)			Измерение №3 ($S = 0,0168 \text{ м}^2, \varphi = 42,74 \%$)		
	$m, \text{ г}$	$\Delta m, \text{ г}$	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5, \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{с}$	$m, \text{ г}$	$\Delta m, \text{ г}$	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5, \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{с}$	$m, \text{ г}$	$\Delta m, \text{ г}$	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5, \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{с}$
0	17,840			20,993			17,311		
600	16,160	1,680	17,817	19,057	1,936	18,710	15,392	1,919	19,090
1200	13,938	2,222	23,565	16,559	2,498	24,141	12,976	2,416	24,034
1800	11,981	1,957	20,754	14,654	1,905	18,410	11,122	1,854	18,443
2400	10,571	1,410	14,953	12,952	1,702	16,449	10,146	0,976	9,709
3000	10,067	0,504	5,345	12,113	0,839	8,108	10,001	0,145	1,442
3600	9,920	0,147	1,559	11,630	0,483	4,668	9,936	0,065	0,647
4200	9,892	0,028	0,297	11,547	0,083	0,802	9,925	0,011	0,109
4800	9,869	0,023	0,244	11,511	0,036	0,348	9,916	0,009	0,090
5400	9,859	0,010	0,106	11,492	0,019	0,184	9,912	0,004	0,040
6000	9,850	0,009	0,095	11,489	0,003	0,029			
6600	9,849	0,001	0,011	11,475	0,014	0,135			
7200				11,469	0,006	0,058			

Таблица В.4 – Результаты расчёта массовой скорости испарения влаги для веток берёзы (Т=393 К)

τ, c	Измерение №1 ($S = 0,0165 \text{ м}^2, \varphi = 47,70 \%$)			Измерение №2 ($S = 0,0167 \text{ м}^2, \varphi = 47,74 \%$)			Измерение №3 ($S = 0,0160 \text{ м}^2, \varphi = 50,31 \%$)		
	$m, \text{ г}$	$\Delta m, \text{ г}$	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5, \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{с}$	$m, \text{ г}$	$\Delta m, \text{ г}$	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5, \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{с}$	$m, \text{ г}$	$\Delta m, \text{ г}$	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5, \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{с}$
0	19,421			19,913			19,387		
600	15,798	3,623	36,558	16,533	3,380	33,701	16,072	3,315	34,486
1200	11,890	3,908	39,434	12,576	3,957	39,454	11,861	4,211	43,807
1800	10,403	1,487	15,005	10,780	1,796	17,907	9,974	1,887	19,630
2400	10,302	0,101	1,019	10,593	0,187	1,865	9,776	0,198	2,060
3000	10,255	0,047	0,474	10,544	0,049	0,489	9,747	0,029	0,302
3600	10,221	0,034	0,343	10,502	0,042	0,419	9,706	0,041	0,427
4200	10,203	0,018	0,182	10,480	0,022	0,219	9,690	0,016	0,166
4800	10,181	0,022	0,222	10,451	0,029	0,289	9,664	0,026	0,270
5400	10,170	0,011	0,111	10,428	0,023	0,229	9,649	0,015	0,156
6000	10,157	0,013	0,131	10,415	0,013	0,130	9,633	0,016	0,166
6600				10,407	0,008	0,080			

Таблица В.5 – Результаты расчёта массовой скорости испарения влаги для веток липы (Т=333 К)

$\tau, \text{с}$	Измерение №1 ($S = 0,0163 \text{ м}^2, \varphi = 48,99 \%$)			Измерение №2 ($S = 0,0167 \text{ м}^2, \varphi = 53,23 \%$)			Измерение №3 ($S = 0,0158 \text{ м}^2, \varphi = 55,09 \%$)		
	$m, \text{г}$	$\Delta m, \text{г}$	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5, \text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$	$m, \text{г}$	$\Delta m, \text{г}$	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5, \text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$	$m, \text{г}$	$\Delta m, \text{г}$	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5, \text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$
0	15,206			18,305			16,385		
600	14,316	0,890	9,128	17,642	0,663	6,607	15,715	0,670	7,050
1200	13,117	1,199	12,297	16,810	0,832	8,291	15,002	0,713	7,503
1800	12,340	0,777	7,969	16,189	0,621	6,189	14,476	0,526	5,535
2400	11,914	0,426	4,369	15,456	0,733	7,305	13,757	0,719	7,566
3000	11,208	0,706	7,241	14,752	0,704	7,016	13,090	0,667	7,019
3600	10,559	0,649	6,656	14,300	0,452	4,504	12,636	0,454	4,777
4200	10,181	0,378	3,877	13,676	0,624	6,218	12,031	0,605	6,366
4800	9,741	0,440	4,513	13,037	0,639	6,368	11,397	0,634	6,671
5400	9,268	0,473	4,851	12,601	0,436	4,345	10,965	0,432	4,546
6000	8,978	0,290	2,974	12,110	0,491	4,893	10,531	0,434	4,567
6600	8,718	0,260	2,667	11,522	0,588	5,860	9,966	0,565	5,945
7200	8,412	0,306	3,138	11,118	0,404	4,026	9,570	0,396	4,167
7800	8,230	0,182	1,867	10,760	0,358	3,568	9,301	0,269	2,831
8400	8,130	0,100	1,026	10,274	0,486	4,843	8,883	0,418	4,398
9000	8,003	0,127	1,303	9,892	0,382	3,807	8,553	0,330	3,472
9600	7,923	0,080	0,820	9,669	0,223	2,222	8,363	0,190	1,999
10200	7,886	0,037	0,379	9,338	0,331	3,299	8,139	0,224	2,357
10800	7,849	0,037	0,379	9,073	0,265	2,641	7,903	0,236	2,483
11400	7,797	0,052	0,533	8,919	0,154	1,535	7,759	0,144	1,515
12000	7,776	0,021	0,215	8,821	0,098	0,977	7,662	0,097	1,021
12600	7,757	0,019	0,195	8,689	0,132	1,315	7,539	0,123	1,294
13200				8,630	0,059	0,588	7,468	0,071	0,747
13800				8,579	0,051	0,508	7,433	0,035	0,368
14400				8,562	0,017	0,169	7,393	0,040	0,421
15000							7,359	0,034	0,358

Таблица В.6 – Результаты расчёта массовой скорости испарения влаги для веток липы (Т=353 К)

τ, c	Измерение №1 ($S = 0,0190 \text{ м}^2, \varphi = 53,68 \%$)			Измерение №2 ($S = 0,0178 \text{ м}^2, \varphi = 54,16 \%$)			Измерение №3 ($S = 0,0181 \text{ м}^2, \varphi = 49,00 \%$)		
	$m, \text{ г}$	$\Delta m, \text{ г}$	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5, \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{с}$	$m, \text{ г}$	$\Delta m, \text{ г}$	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5, \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{с}$	$m, \text{ г}$	$\Delta m, \text{ г}$	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5, \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{с}$
0	23,185			20,565			18,824		
600	21,227	1,958	17,216	18,617	1,948	18,193	17,436	1,388	12,795
1200	18,869	2,358	20,733	16,173	2,444	22,826	15,634	1,802	16,612
1800	17,086	1,783	15,677	14,540	1,633	15,251	14,330	1,304	12,021
2400	15,127	1,959	17,225	12,703	1,837	17,157	12,973	1,357	12,510
3000	13,812	1,315	11,562	11,398	1,305	12,188	11,969	1,004	9,256
3600	12,444	1,368	12,028	10,598	0,800	7,472	11,241	0,728	6,711
4200	11,607	0,837	7,359	9,945	0,653	6,099	10,534	0,707	6,518
4800	11,290	0,317	2,787	9,770	0,175	1,634	10,144	0,390	3,595
5400	10,948	0,342	3,007	9,605	0,165	1,541	9,921	0,223	2,056
6000	10,866	0,082	0,721	9,506	0,099	0,925	9,759	0,162	1,493
6600	10,837	0,029	0,255	9,493	0,013	0,121	9,693	0,066	0,608
7200	10,743	0,094	0,827	9,446	0,047	0,439	9,660	0,033	0,304
7800	10,740	0,003	0,026	9,427	0,019	0,177	9,626	0,034	0,313
8400							9,614	0,012	0,111
9000							9,600	0,014	0,129

Таблица В.7 – Результаты расчёта массовой скорости испарения влаги для веток липы (Т=373 К)

τ, c	Измерение №1 ($S = 0,0159 \text{ м}^2, \varphi = 53,88 \%$)			Измерение №2 ($S = 0,0149 \text{ м}^2, \varphi = 55,04 \%$)			Измерение №3 ($S = 0,0154 \text{ м}^2, \varphi = 54,09 \%$)		
	$m, \text{ г}$	$\Delta m, \text{ г}$	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5, \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{с}$	$m, \text{ г}$	$\Delta m, \text{ г}$	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5, \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{с}$	$m, \text{ г}$	$\Delta m, \text{ г}$	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5, \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{с}$
0	15,349			14,341			15,710		
600	12,628	2,721	28,565	11,531	2,810	31,453	13,337	2,373	25,691
1200	9,698	2,930	30,760	8,620	2,911	32,584	10,207	3,130	33,886
1800	8,003	1,695	17,794	6,951	1,669	18,682	8,428	1,779	19,260
2400	7,210	0,793	8,325	6,522	0,429	4,802	7,424	1,004	10,870
3000	7,139	0,071	0,745	6,491	0,031	0,347	7,303	0,121	1,310
3600	7,114	0,025	0,262	6,461	0,030	0,336	7,263	0,040	0,433
4200	7,107	0,007	0,073	6,456	0,005	0,056	7,245	0,018	0,195
4800	7,097	0,010	0,105	6,448	0,008	0,090	7,233	0,012	0,130
5400	7,085	0,012	0,126				7,221	0,012	0,130
6000	7,079	0,006	0,063				7,220	0,001	0,011
6600							7,212	0,008	0,087

Таблица В.8 – Результаты расчёта массовой скорости испарения влаги для веток липы (Т=393 К)

τ , с	Измерение №1 ($S = 0,0171 \text{ м}^2$, $\varphi = 52,57 \%$)			Измерение №2 ($S = 0,0178 \text{ м}^2$, $\varphi = 53,47 \%$)			Измерение №3 ($S = 0,0189 \text{ м}^2$, $\varphi = 53,64 \%$)		
	m , г	Δm , г	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5$, кг/м ² ·с	m , г	Δm , г	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5$, кг/м ² ·с	m , г	Δm , г	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5$, кг/м ² ·с
0	18,083			20,112			19,899		
600	14,596	3,487	33,892	15,937	4,175	39,028	16,425	3,474	30,606
1200	10,951	3,645	35,428	11,919	4,018	37,561	11,843	4,582	40,368
1800	9,024	1,927	18,730	9,814	2,105	19,678	9,664	2,179	19,197
2400	8,828	0,196	1,905	9,533	0,281	2,627	9,390	0,274	2,414
3000	8,768	0,060	0,583	9,476	0,057	0,533	9,351	0,039	0,344
3600	8,719	0,049	0,476	9,455	0,021	0,196	9,303	0,048	0,423
4200	8,694	0,025	0,243	9,427	0,028	0,262	9,287	0,016	0,141
4800	8,658	0,036	0,350	9,408	0,019	0,178	9,268	0,019	0,167
5400	8,641	0,017	0,165	9,390	0,018	0,168	9,249	0,019	0,167
6000	8,615	0,026	0,253	9,374	0,016	0,150	9,239	0,010	0,088
6600	8,600	0,015	0,146	9,359	0,015	0,140	9,225	0,014	0,123
7200	8,576	0,024	0,233						

Таблица В.9 – Результаты расчёта массовой скорости испарения влаги для веток тополя (Т=333 К)

τ, с	Измерение №1 (S = 0,0202 м ² , φ = 39,96 %)			Измерение №2 (S = 0,0190 м ² , φ = 44,13 %)			Измерение №3 (S = 0,0185 м ² , φ = 42,84 %)		
	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/м ² ·с
0	26,315			26,952			25,331		
600	24,339	1,976	16,265	25,969	0,983	8,643	24,519	0,812	7,312
1200	22,703	1,636	13,466	24,157	1,812	15,931	23,438	1,081	9,734
1800	21,682	1,021	8,404	23,585	0,572	8,404	22,590	0,848	7,636
2400	21,226	0,456	3,753	22,913	0,672	5,908	21,962	0,628	5,655
3000	20,622	0,604	4,972	22,210	0,703	6,181	21,410	0,552	4,970
3600	20,002	0,620	5,103	21,673	0,537	4,721	20,697	0,713	6,420
4200	19,701	0,301	2,478	21,208	0,465	4,088	20,093	0,604	5,439
4800	19,374	0,327	2,692	20,609	0,599	5,267	19,642	0,451	4,061
5400	18,864	0,510	4,198	20,101	0,508	4,466	19,137	0,505	4,547
6000	18,567	0,297	2,445	19,724	0,377	3,315	18,596	0,541	4,871
6600	18,498	0,069	0,568	19,327	0,397	3,491	18,178	0,418	3,764
7200	18,157	0,341	2,807	18,874	0,453	3,983	17,847	0,331	2,980
7800	17,804	0,353	2,906	18,517	0,357	3,139	17,445	0,402	3,620
8400	17,755	0,049	0,403	18,244	0,273	2,400	17,073	0,372	3,350
9000	17,623	0,132	1,087	17,900	0,344	3,025	16,796	0,277	2,494
9600	17,352	0,271	2,231	17,562	0,338	2,972	16,554	0,242	2,179
10200	17,098	0,254	2,091	17,305	0,257	2,260	16,259	0,295	2,656
10800	16,925	0,173	1,424	17,092	0,213	1,873	16,011	0,248	2,233
11400	16,776	0,149	1,226	16,813	0,279	2,453	15,830	0,181	1,630
12000	16,597	0,179	1,473	16,569	0,244	2,145	15,642	0,188	1,693
12600	16,460	0,137	1,128	16,403	0,166	1,460	15,436	0,206	1,855
13200	16,383	0,077	0,634	16,238	0,165	1,451	15,290	0,146	1,315
13800	16,284	0,099	0,815	16,036	0,202	1,776	15,178	0,112	1,008
14400	16,193	0,091	0,749	15,886	0,150	1,319	15,088	0,090	0,810
15000	16,129	0,064	0,527	15,792	0,094	0,826	14,986	0,102	0,918
15600	16,093	0,036	0,296	15,675	0,117	1,029	14,892	0,094	0,846
16200	16,041	0,052	0,428	15,562	0,113	0,994	14,835	0,057	0,513
16800	15,992	0,049	0,403	15,476	0,086	0,756	14,789	0,046	0,414
17400	15,971	0,021	0,173	15,424	0,052	0,457	14,724	0,065	0,585
18000	15,950	0,021	0,173	15,356	0,068	0,598	14,672	0,052	0,468
18600	15,927	0,023	0,189	15,293	0,063	0,554	14,640	0,032	0,288
19200	15,900	0,027	0,222	15,256	0,037	0,325	14,609	0,031	0,279
19800	15,891	0,009	0,074	15,222	0,034	0,299	14,569	0,040	0,360
20400	15,875	0,016	0,132	15,190	0,032	0,281	14,553	0,016	0,144
21000	15,855	0,020	0,165	15,160	0,030	0,264	14,536	0,017	0,153
21600	15,846	0,009	0,074	15,133	0,027	0,237	14,518	0,018	0,162
22200	15,837	0,009	0,074	15,109	0,024	0,211	14,493	0,025	0,225
22800	15,826	0,011	0,091	15,082	0,027	0,237	14,483	0,010	0,090
23400	15,815	0,011	0,091	15,068	0,014	0,123	14,479	0,004	0,036
24000	15,803	0,012	0,099	15,059	0,009	0,079			
24600	15,802	0,001	0,008						
25200	15,800	0,002	0,016						

Таблица В.10 – Результаты расчёта массовой скорости испарения влаги для веток тополя (Т=353 К)

τ , с	Измерение №1 ($S = 0,0200 \text{ м}^2$, $\varphi = 48,41 \%$)			Измерение №2 ($S = 0,0176 \text{ м}^2$, $\varphi = 45,54 \%$)			Измерение №3 ($S = 0,0185 \text{ м}^2$, $\varphi = 45,13 \%$)		
	m , г	Δm , г	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5$, кг/ м ² ·с	m , г	Δm , г	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5$, кг/ м ² ·с	m , г	Δm , г	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5$, кг/ м ² ·с
0	30,835			23,272			24,218		
600	29,310	1,525	12,712	21,548	1,724	16,316	22,617	1,601	14,394
1200	27,569	1,741	14,512	19,651	1,897	17,953	20,841	1,776	15,967
1800	26,132	1,437	11,978	18,246	1,405	13,297	19,494	1,347	12,110
2400	24,469	1,663	13,862	16,777	1,469	13,903	18,091	1,403	12,614
3000	23,107	1,362	11,353	15,682	1,095	10,363	17,025	1,066	9,584
3600	21,939	1,168	9,736	14,828	0,854	8,082	16,184	0,841	7,561
4200	20,668	1,271	10,594	14,009	0,819	7,751	15,372	0,812	7,300
4800	19,716	0,952	7,935	13,541	0,468	4,429	14,860	0,512	4,603
5400	18,841	0,875	7,294	13,195	0,346	3,275	14,414	0,446	4,010
6000	17,956	0,885	7,377	12,935	0,260	2,461	14,031	0,383	3,443
6600	17,383	0,573	4,776	12,840	0,095	0,899	13,820	0,211	1,897
7200	16,845	0,538	4,485	12,770	0,070	0,662	13,630	0,190	1,708
7800	16,406	0,439	3,659	12,722	0,048	0,454	13,496	0,134	1,205
8400	16,302	0,104	0,867	12,700	0,022	0,208	13,445	0,051	0,459
9000	16,081	0,221	1,842	12,689	0,011	0,104	13,380	0,065	0,584
9600	15,992	0,089	0,742	12,676	0,013	0,123	13,347	0,033	0,297
10200	15,982	0,010	0,083	12,675	0,001	0,009	13,331	0,016	0,144
10800	15,930	0,052	0,433				13,310	0,021	0,189
11400	15,907	0,023	0,192				13,297	0,013	0,117
12000							13,289	0,008	0,072

Таблица В.11 – Результаты расчёта массовой скорости испарения влаги для веток тополя (Т=373 К)

τ, c	Измерение №1 ($S = 0,0193 \text{ м}^2, \varphi = 48,66 \%$)			Измерение №2 ($S = 0,0207 \text{ м}^2, \varphi = 42,38 \%$)			Измерение №3 ($S = 0,0192 \text{ м}^2, \varphi = 49,58 \%$)		
	$m, \text{ г}$	$\Delta m, \text{ г}$	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5, \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{с}$	$m, \text{ г}$	$\Delta m, \text{ г}$	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5, \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{с}$	$m, \text{ г}$	$\Delta m, \text{ г}$	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5, \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{с}$
0	28,862			29,195			23,926		
600	26,537	2,325	20,069	26,617	2,578	20,755	21,082	2,844	24,716
1200	23,466	3,071	26,508	23,880	2,737	22,035	18,089	2,993	26,011
1800	20,966	2,500	21,579	21,762	2,118	17,051	15,898	2,191	19,041
2400	18,466	2,500	21,579	19,803	1,959	15,771	14,229	1,669	14,505
3000	16,990	1,476	12,740	18,621	1,182	9,516	13,326	0,903	7,848
3600	15,810	1,180	10,185	17,660	0,961	7,737	12,779	0,547	4,754
4200	15,220	0,590	5,093	17,266	0,394	3,172	12,447	0,332	2,885
4800	15,028	0,192	1,657	17,090	0,176	1,417	12,226	0,221	1,921
5400	14,951	0,077	0,665	17,001	0,089	0,717	12,164	0,062	0,539
6000	14,935	0,016	0,138	16,969	0,032	0,258	12,135	0,029	0,252
6600	14,912	0,023	0,199	16,930	0,039	0,314	12,116	0,019	0,165
7200	14,896	0,016	0,138	16,902	0,028	0,225	12,103	0,013	0,113
7800	14,884	0,012	0,104	16,886	0,016	0,129	12,095	0,008	0,070
8400	14,866	0,018	0,155	16,858	0,028	0,225	12,085	0,010	0,087
9000	14,848	0,018	0,155	16,849	0,009	0,072	12,076	0,009	0,078
9600	14,834	0,014	0,121	16,834	0,015	0,121	12,068	0,008	0,070
10200	14,817	0,017	0,147	16,821	0,013	0,105	12,063	0,005	0,043

Таблица В.12 – Результаты расчёта массовой скорости испарения влаги для веток тополя (Т=393 К)

τ, c	Измерение №1 ($S = 0,0194 \text{ м}^2, \varphi = 47,52 \%$)			Измерение №2 ($S = 0,0176 \text{ м}^2, \varphi = 52,25 \%$)			Измерение №3 ($S = 0,0179 \text{ м}^2, \varphi = 55,43 \%$)		
	$m, \text{ г}$	$\Delta m, \text{ г}$	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5, \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{с}$	$m, \text{ г}$	$\Delta m, \text{ г}$	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5, \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{с}$	$m, \text{ г}$	$\Delta m, \text{ г}$	$W_{\text{исп}} \cdot 10^5, \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{с}$
0	24,813			23,165			28,027		
600	21,208	3,605	30,930	19,529	3,636	34,379	24,204	3,823	35,659
1200	17,336	3,872	33,221	17,129	2,400	22,692	20,102	4,102	38,262
1800	14,824	2,512	21,552	13,772	3,357	31,741	16,434	3,668	34,214
2400	13,727	1,097	9,412	11,826	1,946	18,400	13,551	2,883	26,891
3000	13,383	0,344	2,951	11,348	0,478	4,520	12,891	0,660	6,156
3600	13,290	0,093	0,798	11,247	0,101	0,955	12,756	0,135	1,259
4200	13,234	0,056	0,480	11,191	0,056	0,529	12,697	0,059	0,550
4800	13,185	0,049	0,420	11,160	0,031	0,293	12,631	0,066	0,616
5400	13,144	0,041	0,352	11,134	0,026	0,246	12,604	0,027	0,252
6000	13,118	0,026	0,223	11,102	0,032	0,303	12,565	0,039	0,364
6600	13,098	0,020	0,172	11,085	0,017	0,161	12,561	0,004	0,037
7200	13,069	0,029	0,249	11,072	0,013	0,123	12,527	0,034	0,317
7800	13,048	0,021	0,180	11,061	0,011	0,104	12,518	0,009	0,084
8400	13,038	0,010	0,086				12,502	0,016	0,149
9000	13,023	0,015	0,129				12,492	0,010	0,093

Таблица В.13 – Результаты расчёта массовой скорости испарения влаги для листьев берёзы (Т=333 К)

τ, с	Измерение №1 (φ = 73,50 %)			Измерение №2 (φ = 75,25 %)			Измерение №3 (φ = 77,00 %)		
	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с
0	20,00			20,00			20,00		
600	19,25	0,75	6,897	18,90	1,10	10,115	18,90	1,10	10,115
1200	18,50	0,75	6,897	17,85	1,05	9,655	17,90	1,00	9,195
1800	17,70	0,80	7,356	16,95	0,90	8,276	17,05	0,85	7,816
2400	17,00	0,70	6,437	16,15	0,80	7,356	16,25	0,80	7,356
3000	16,30	0,70	6,437	15,35	0,80	7,356	15,50	0,75	6,897
3600	15,60	0,70	6,437	14,60	0,75	6,897	14,70	0,80	7,356
4200	14,90	0,70	6,437	13,90	0,70	6,437	14,00	0,70	6,437
4800	14,25	0,65	5,977	13,20	0,70	6,437	13,30	0,70	6,437
5400	13,60	0,65	5,977	12,55	0,65	5,977	12,65	0,65	5,977
6000	13,05	0,55	5,057	11,95	0,60	5,517	12,05	0,60	5,517
6600	12,50	0,55	5,057	11,35	0,60	5,517	11,45	0,60	5,517
7200	11,95	0,55	5,057	10,80	0,55	5,057	10,85	0,60	5,517
7800	11,40	0,55	5,057	10,25	0,55	5,057	10,35	0,50	4,598
8400	10,90	0,50	4,598	9,75	0,50	4,598	9,80	0,55	5,057
9000	10,45	0,45	4,138	9,30	0,45	4,138	9,30	0,50	4,598
9600	10,00	0,45	4,138	8,85	0,45	4,138	8,80	0,50	4,598
10200	9,55	0,45	4,138	8,45	0,40	3,678	8,35	0,45	4,138
10800	9,10	0,45	4,138	8,05	0,40	3,678	7,90	0,45	4,138
11400	8,70	0,40	3,678	7,70	0,35	3,218	7,55	0,35	3,218
12000	8,30	0,40	3,678	7,40	0,30	2,759	7,20	0,35	3,218
12600	7,95	0,35	3,218	7,10	0,30	2,759	6,85	0,35	3,218
13200	7,60	0,35	3,218	6,80	0,30	2,759	6,50	0,35	3,218
13800	7,30	0,30	2,759	6,55	0,25	2,299	6,20	0,30	2,759
14400	7,00	0,30	2,759	6,30	0,25	2,299	5,90	0,30	2,759
15000	6,70	0,30	2,759	6,10	0,20	1,839	5,65	0,25	2,299
15600	6,45	0,25	2,299	5,90	0,20	1,839	5,45	0,20	1,839
16200	6,20	0,25	2,299	5,75	0,15	1,379	5,25	0,20	1,839
16800	6,00	0,20	1,839	5,60	0,15	1,379	5,10	0,15	1,379
17400	5,80	0,20	1,839	5,45	0,15	1,379	4,95	0,15	1,379
18000	5,65	0,15	1,379	5,35	0,10	0,920	4,85	0,10	0,920
18600	5,55	0,10	0,920	5,20	0,15	1,379	4,75	0,10	0,920
19200	5,45	0,10	0,920	5,15	0,05	0,460	4,70	0,05	0,460
19800	5,40	0,05	0,460	5,05	0,10	0,920	4,65	0,05	0,460
20400	5,35	0,05	0,460	5,00	0,05	0,460	4,60	0,05	0,460
21000	5,30	0,05	0,460	4,95	0,05	0,460	4,60	0	0

Таблица В.14 – Результаты расчёта массовой скорости испарения влаги для листьев берёзы (Т=353 К)

τ, с	Измерение №1 (φ = 73,00 %)			Измерение №2 (φ = 75,50 %)			Измерение №3 (φ = 67,25 %)		
	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с
0	20,00			20,00			20,00		
600	18,65	1,35	12,414	18,55	1,45	13,333	18,40	1,60	14,713
1200	17,30	1,35	12,414	17,00	1,55	14,253	16,95	1,45	13,333
1800	16,00	1,30	11,954	15,70	1,30	11,954	15,65	1,30	11,954
2400	14,75	1,25	11,494	14,45	1,25	11,494	14,45	1,20	11,034
3000	13,60	1,15	10,575	13,30	1,15	10,575	13,45	1,00	9,195
3600	12,55	1,05	9,655	12,20	1,10	10,115	12,50	0,95	8,736
4200	11,60	0,95	8,736	11,15	1,05	9,655	11,65	0,85	7,816
4800	10,70	0,90	8,276	10,20	0,95	8,736	10,90	0,75	6,897
5400	9,90	0,80	7,356	9,35	0,85	7,816	10,20	0,70	6,437
6000	9,15	0,75	6,897	8,50	0,85	7,816	9,60	0,60	5,517
6600	8,40	0,75	6,897	7,75	0,75	6,897	8,85	0,75	6,897
7200	7,80	0,60	5,517	7,10	0,65	5,977	8,40	0,45	4,138
7800	7,20	0,60	5,517	6,55	0,55	5,057	7,95	0,45	4,138
8400	6,70	0,50	4,598	6,10	0,45	4,138	7,65	0,30	2,759
9000	6,30	0,40	3,678	5,70	0,40	3,678	7,35	0,30	2,759
9600	5,95	0,35	3,218	5,45	0,25	2,299	7,10	0,25	2,299
10200	5,70	0,25	2,299	5,25	0,20	1,839	6,95	0,15	1,379
10800	5,55	0,15	1,379	5,10	0,15	1,379	6,80	0,15	1,379
11400	5,50	0,05	0,460	5,00	0,10	0,920	6,75	0,05	0,460
12000	5,45	0,05	0,460	4,95	0,05	0,460	6,65	0,10	0,920
12600	5,40	0,05	0,460	4,90	0,05	0,460	6,55	0,10	0,920

Таблица В.15 – Результаты расчёта массовой скорости испарения влаги для листьев берёзы (Т=373 К)

τ, с	Измерение №1 (φ = 72,03 %)			Измерение №2 (φ = 71,00 %)			Измерение №3 (φ = 71,75 %)		
	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с
0	20,20			20,00			20,00		
600	17,70	2,50	22,989	17,75	2,25	20,690	17,55	2,45	22,529
1200	15,60	2,10	19,310	15,25	2,50	22,989	14,85	2,70	24,828
1800	13,70	1,90	17,471	13,10	2,15	19,770	12,80	2,05	18,851
2400	12,00	1,70	15,632	11,35	1,75	16,092	11,05	1,75	16,092
3000	10,55	1,45	13,333	10,05	1,30	11,954	9,65	1,40	12,874
3600	9,25	1,30	11,954	8,70	1,35	12,414	8,45	1,20	11,034
4200	8,20	1,05	9,655	7,75	0,95	8,736	7,45	1,00	9,195
4800	7,30	0,90	8,276	7,00	0,75	6,897	6,75	0,70	6,437
5400	6,55	0,75	6,897	6,50	0,50	4,598	6,30	0,45	4,138
6000	6,10	0,45	4,138	6,15	0,35	3,218	5,95	0,35	3,218
6600	5,80	0,30	2,759	5,95	0,20	1,839	5,75	0,20	1,839
7200	5,70	0,10	0,920	5,85	0,10	0,920	5,70	0,05	0,460
7800	5,65	0,05	0,460	5,80	0,05	0,460	5,65	0,05	0,460

Таблица В.16 – Результаты расчёта массовой скорости испарения влаги для листьев берёзы (Т=393 К)

τ, с	Измерение №1 (φ = 79,75 %)			Измерение №2 (φ = 80,25 %)			Измерение №3 (φ = 79,00 %)		
	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с
0	20,00			20,00			20,00		
600	16,90	3,10	28,506	16,95	3,05	28,046	17,05	2,95	27,126
1200	13,50	3,40	31,264	13,45	3,50	32,184	13,95	3,10	28,506
1800	10,60	2,90	26,667	10,65	2,80	25,747	11,35	2,60	23,908
2400	8,15	2,45	22,529	8,45	2,20	20,230	9,20	2,15	19,770
3000	6,25	1,90	17,471	6,80	1,65	15,172	7,45	1,75	16,092
3600	5,05	1,20	11,034	5,60	1,20	11,034	6,10	1,35	12,414
4200	4,45	0,60	5,517	4,85	0,75	6,897	5,20	0,90	8,276
4800	4,25	0,20	1,839	4,30	0,55	5,057	4,75	0,45	4,138
5400	4,20	0,05	0,460	4,10	0,20	1,839	4,45	0,30	2,759
6000	4,15	0,05	0,460	4,05	0,05	0,460	4,35	0,10	0,920
6600	4,10	0,05	0,460	4,00	0,05	0,460	4,30	0,05	0,460
7200	4,10	0,00	0,000	3,95	0,05	0,460	4,25	0,05	0,460
7800	4,05	0,05	0,460	3,95	0	0	4,20	0,05	0,460

Таблица В.17 – Результаты расчёта массовой скорости испарения влаги для листьев липы (Т=333 К)

τ , с	Измерение №1 ($\varphi = 74,48\%$)			Измерение №2 ($\varphi = 75,80\%$)			Измерение №3 ($\varphi = 72,03\%$)		
	m , г	Δm , г	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/м ² ·с	m , г	Δm , г	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/м ² ·с	m , г	Δm , г	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/м ² ·с
0	20,078			20,012			20,065		
600	18,417	1,661	15,274	18,324	1,688	15,522	18,534	1,531	14,078
1200	16,693	1,724	15,853	16,679	1,645	15,126	16,980	1,554	14,290
1800	15,553	1,140	10,483	15,577	1,102	10,133	15,428	1,552	14,271
2400	14,221	1,332	12,248	14,735	0,842	7,743	13,822	1,606	14,768
3000	12,606	1,615	14,851	13,233	1,502	13,811	12,714	1,108	10,189
3600	11,491	1,115	10,253	11,790	1,443	13,269	11,789	0,925	8,506
4200	10,723	0,768	7,062	10,826	0,964	8,864	10,480	1,309	12,037
4800	9,750	0,973	8,947	10,129	0,697	6,409	9,495	0,985	9,057
5400	8,828	0,922	8,478	9,215	0,914	8,405	8,842	0,653	6,005
6000	8,210	0,618	5,683	8,436	0,779	7,163	8,318	0,524	4,818
6600	7,599	0,611	5,618	7,887	0,549	5,048	7,559	0,759	6,979
7200	6,882	0,717	6,593	7,127	0,760	6,989	6,985	0,574	5,278
7800	6,413	0,469	4,313	6,338	0,789	7,255	6,646	0,339	3,117
8400	6,080	0,333	3,062	5,858	0,480	4,414	6,286	0,360	3,310
9000	5,614	0,466	4,285	5,587	0,271	2,492	5,921	0,365	3,356
9600	5,343	0,271	2,492	5,222	0,365	3,356	5,767	0,154	1,416
10200	5,265	0,078	0,717	4,997	0,225	2,069	5,698	0,069	0,634
10800	5,186	0,079	0,726	4,915	0,082	0,754	5,651	0,047	0,432
11400	5,156	0,030	0,276	4,863	0,052	0,478	5,629	0,022	0,202
12000	5,138	0,018	0,166	4,852	0,011	0,101	5,62	0,009	0,083
12600	5,128	0,010	0,092	4,846	0,006	0,055	5,612	0,008	0,074
13200	5,127	0,001	0,009	4,842	0,004	0,037	5,606	0,006	0,055
13800	5,124	0,003	0,028				5,604	0,002	0,018

Таблица В.18 – Результаты расчёта массовой скорости испарения влаги для листьев липы (Т=353 К)

τ, с	Измерение №1 (φ = 75,28 %)			Измерение №2 (φ = 73,75 %)			Измерение №3 (φ = 74,93 %)		
	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с
0	20,019			20,009			20,024		
600	17,074	2,945	27,080	17,255	2,754	25,324	17,313	2,711	24,929
1200	14,351	2,723	25,039	14,181	3,074	28,267	14,373	2,940	27,034
1800	11,297	3,054	28,083	11,574	2,607	23,972	12,065	2,308	21,223
2400	9,413	1,884	17,324	9,291	2,283	20,993	9,712	2,353	21,637
3000	7,986	1,427	13,122	7,256	2,035	18,713	8,203	1,509	13,876
3600	6,650	1,336	12,285	6,207	1,049	9,646	6,889	1,314	12,083
4200	5,942	0,708	6,510	5,633	0,574	5,278	5,720	1,169	10,749
4800	5,358	0,584	5,370	5,355	0,278	2,556	5,237	0,483	4,441
5400	4,992	0,366	3,366	5,308	0,047	0,432	5,144	0,093	0,855
6000	4,960	0,032	0,294	5,284	0,024	0,221	5,058	0,086	0,791
6600	4,953	0,007	0,064	5,269	0,015	0,138	5,029	0,029	0,267
7200	4,950	0,003	0,028	5,259	0,010	0,092	5,024	0,005	0,046
7800	4,949	0,001	0,009	5,253	0,006	0,055	5,021	0,003	0,028

Таблица В.19 – Результаты расчёта массовой скорости испарения влаги для листьев липы (Т=373 К)

τ, с	Измерение №1 (φ = 75,02 %)			Измерение №2 (φ = 74,87 %)			Измерение №3 (φ = 74,67 %)		
	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с
0	20,066			20,034			20,031		
600	15,280	4,786	44,009	14,737	5,297	48,708	15,573	4,458	40,993
1200	11,037	4,243	39,016	10,127	4,610	42,391	10,566	5,007	46,041
1800	7,859	3,178	29,223	7,322	2,805	25,793	7,854	2,712	24,938
2400	5,818	2,041	18,768	5,540	1,782	16,386	5,920	1,934	17,784
3000	5,221	0,597	5,490	5,190	0,350	3,218	5,280	0,640	5,885
3600	5,104	0,117	1,076	5,079	0,111	1,021	5,162	0,118	1,085
4200	5,053	0,051	0,469	5,055	0,024	0,221	5,107	0,055	0,506
4800	5,033	0,020	0,184	5,047	0,008	0,074	5,087	0,020	0,184
5400	5,022	0,011	0,101	5,040	0,007	0,064	5,080	0,007	0,064
6000	5,016	0,006	0,055	5,036	0,004	0,037	5,075	0,005	0,046
6600	5,013	0,003	0,028	5,034	0,002	0,018	5,074	0,001	0,009

Таблица В.20 – Результаты расчёта массовой скорости испарения влаги для листьев липы (Т=393 К)

τ, с	Измерение №1 (φ = 74,58 %)			Измерение №2 (φ = 72,69 %)			Измерение №3 (φ = 76,38 %)		
	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с
0	20,059			20,053			20,067		
600	12,960	7,099	65,278	12,560	7,493	68,901	13,194	6,873	63,200
1200	7,258	5,702	52,432	8,150	4,410	40,552	7,423	5,771	53,067
1800	5,266	1,992	18,317	5,958	2,192	20,156	5,054	2,369	21,784
2400	5,158	0,108	0,993	5,666	0,292	2,685	4,839	0,215	1,977
3000	5,106	0,052	0,478	5,622	0,044	0,405	4,780	0,059	0,543
3600	5,100	0,006	0,055	5,600	0,022	0,202	4,753	0,027	0,248
4200	5,098	0,002	0,018	5,480	0,120	1,103	4,742	0,011	0,101
4800				5,477	0,003	0,028	4,740	0,002	0,018

Таблица В.21 – Результаты расчёта массовой скорости испарения влаги для листьев тополя (Т=333 К)

τ, с	Измерение №1 (φ = 73,56 %)			Измерение №2 (φ = 66,35 %)			Измерение №3 (φ = 67,86 %)		
	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с
0	20,003			20,003			20,035		
600	18,118	1,885	17,333	18,749	1,254	11,531	19,071	0,964	8,864
1200	15,865	2,253	20,717	17,338	1,411	12,975	17,598	1,473	13,545
1800	14,536	1,329	12,221	15,726	1,612	14,823	16,482	1,116	10,262
2400	13,203	1,333	12,257	14,392	1,334	12,267	15,137	1,345	12,368
3000	11,774	1,429	13,140	13,482	0,910	8,368	13,936	1,201	11,044
3600	10,832	0,942	8,662	12,341	1,141	10,492	13,075	0,861	7,917
4200	10,041	0,791	7,274	11,261	1,080	9,931	12,030	1,045	9,609
4800	9,032	1,009	9,278	10,532	0,729	6,703	10,934	1,096	10,078
5400	8,309	0,723	6,648	9,675	0,857	7,880	10,187	0,747	6,869
6000	7,758	0,551	5,067	8,800	0,875	8,046	9,462	0,725	6,667
6600	7,019	0,739	6,795	8,246	0,554	5,094	8,601	0,861	7,917
7200	6,503	0,516	4,745	7,947	0,299	2,749	8,008	0,593	5,453
7800	6,271	0,232	2,133	7,398	0,549	5,048	7,608	0,400	3,678
8400	5,804	0,467	4,294	7,014	0,384	3,531	7,038	0,570	5,241
9000	5,481	0,323	2,970	6,949	0,065	0,598	6,745	0,293	2,694
9600	5,458	0,023	0,211	6,887	0,062	0,570	6,507	0,238	2,189
10200	5,393	0,065	0,598	6,816	0,071	0,653	6,452	0,055	0,506
10800	5,296	0,097	0,892	6,760	0,056	0,515	6,443	0,009	0,083
11400	5,290	0,006	0,055	6,740	0,020	0,184	6,440	0,003	0,028
12000	5,289	0,001	0,009	6,735	0,005	0,046			
12600				6,732	0,003	0,028			

Таблица В.22– Результаты расчёта массовой скорости испарения влаги для листьев тополя (Т=353 К)

τ, с	Измерение №1 (φ =70,03 %)			Измерение №2 (φ =70,29 %)			Измерение №3 (φ =74,72 %)		
	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с
0	20,091			20,030			20,048		
600	17,085	3,006	27,641	17,321	2,709	24,910	16,576	3,472	31,926
1200	13,229	3,856	35,457	14,322	2,999	27,577	13,105	3,471	31,917
1800	10,884	2,345	21,563	11,458	2,864	26,336	10,573	2,532	23,283
2400	9,431	1,453	13,361	8,937	2,521	23,182	7,978	2,595	23,862
3000	7,723	1,708	15,706	7,471	1,466	13,480	6,496	1,482	13,628
3600	6,720	1,003	9,223	6,328	1,143	10,510	5,544	0,952	8,754
4200	6,335	0,385	3,540	6,038	0,290	2,667	5,157	0,387	3,559
4800	6,097	0,238	2,189	5,978	0,060	0,552	5,108	0,049	0,451
5400	6,048	0,049	0,451	5,953	0,025	0,230	5,079	0,029	0,267
6000	6,030	0,018	0,166	5,950	0,003	0,028	5,070	0,009	0,083
6600	6,023	0,007	0,064				5,068	0,002	0,018
7200	6,021	0,002	0,018						

Таблица В.23 – Результаты расчёта массовой скорости испарения влаги для листьев тополя (Т=373 К)

τ, с	Измерение №1 (φ = 77,66 %)			Измерение №2 (φ = 74,52 %)			Измерение №3 (φ = 80,48 %)		
	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с
0	18,594			20,000			20,033		
600	13,397	5,197	47,789	14,110	5,890	54,161	13,554	6,479	59,577
1200	8,272	5,125	47,126	9,655	4,455	40,966	8,502	5,052	46,455
1800	5,542	2,730	25,103	6,593	3,062	28,156	5,040	3,462	31,834
2400	4,638	0,904	8,313	5,278	1,315	12,092	4,010	1,030	9,471
3000	4,302	0,336	3,090	5,207	0,071	0,653	3,961	0,049	0,451
3600	4,226	0,076	0,699	5,162	0,045	0,414	3,937	0,024	0,221
4200	4,200	0,026	0,239	5,134	0,028	0,257	3,924	0,013	0,120
4800	4,178	0,022	0,202	5,118	0,016	0,147	3,917	0,007	0,064
5400	4,162	0,016	0,147	5,106	0,012	0,110	3,912	0,005	0,046
6000	4,154	0,008	0,074	5,100	0,006	0,055	3,910	0,002	0,018
6600	4,153	0,001	0,009	5,097	0,003	0,028			
7200				5,096	0,001	0,009			

Таблица В.24 – Результаты расчёта массовой скорости испарения влаги для листьев тополя (Т=393 К)

τ, с	Измерение №1 (φ = 77,07 %)			Измерение №2 (φ = 72,15 %)			Измерение №3 (φ = 71,57 %)		
	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с	m, г	Δm, г	W _{исп} · 10 ⁵ , кг/ м ² ·с
0	20,035			20,057			20,015		
600	12,417	7,618	70,051	13,557	6,500	59,770	12,927	7,088	65,177
1200	7,038	5,379	49,462	7,857	5,700	52,414	7,296	5,631	51,779
1800	4,958	2,080	19,126	6,088	1,769	16,267	5,929	1,367	12,570
2400	4,801	0,157	1,444	5,740	0,348	3,200	5,785	0,144	1,324
3000	4,699	0,102	0,938	5,623	0,117	1,076	5,733	0,052	0,478
3600	4,614	0,085	0,782	5,601	0,022	0,202	5,702	0,031	0,285
4200	4,598	0,016	0,147	5,588	0,013	0,120	5,692	0,010	0,092
4800	4,594	0,004	0,037	5,586	0,002	0,018	5,690	0,002	0,018

Приложение Г

Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения

Таблица Г.1 – Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения влаги из веток берёзы (T=333 К)

Массовая скорость испарения · 10 ⁵ , кг/(м ² ·с)			$\bar{W} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	${}^n S_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	v_{k1}	v_{k2}	v_{k3}	${}^n S_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$\Delta W \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	δ_W
W_1	W_2	W_3								
6,736	5,728	6,596	6,353	0,546	0,701	1,145	0,444	0,315	1,355	0,213
8,939	8,938	7,828	8,568	0,641	0,577	0,577	1,155	0,370	1,592	0,186
6,213	6,664	5,454	6,110	0,611	0,167	0,906	1,073	0,353	1,518	0,248
4,761	4,783	3,707	4,417	0,615	0,559	0,595	1,155	0,355	1,526	0,346
6,015	3,950	3,404	4,456	1,377	1,132	0,368	0,764	0,795	3,419	0,767
5,156	5,082	5,545	5,261	0,249	0,423	0,719	1,142	0,144	0,618	0,117
3,585	4,493	4,717	4,265	0,599	1,134	0,380	0,754	0,346	1,488	0,349
4,198	3,164	3,454	3,605	0,533	1,111	0,828	0,283	0,308	1,324	0,367
4,543	3,332	2,707	3,527	0,934	1,088	0,209	0,879	0,539	2,318	0,657
3,378	4,034	4,242	3,885	0,451	1,124	0,331	0,793	0,260	1,120	0,288
2,311	3,070	3,909	3,097	0,799	0,983	0,033	1,016	0,461	1,984	0,641
3,210	2,274	2,798	2,761	0,469	0,958	1,037	0,079	0,271	1,164	0,422
2,904	3,042	1,990	2,645	0,572	0,452	0,694	1,146	0,330	1,419	0,537
1,966	3,145	3,071	2,727	0,660	1,153	0,633	0,520	0,381	1,640	0,601
1,709	2,302	2,929	2,313	0,610	0,991	0,018	1,009	0,352	1,515	0,655
2,252	1,610	2,071	1,977	0,331	0,829	1,111	0,281	0,191	0,822	0,416
1,649	2,284	1,333	1,755	0,484	0,219	1,091	0,872	0,279	1,202	0,685
1,096	2,040	1,121	1,419	0,538	0,600	1,154	0,554	0,311	1,336	0,941
1,333	1,329	2,364	1,675	0,596	0,574	0,581	1,155	0,344	1,480	0,883
1,412	1,170	1,485	1,356	0,165	0,344	1,127	0,783	0,095	0,409	0,302
1,027	1,600	0,889	1,172	0,377	0,384	1,135	0,751	0,218	0,937	0,799
0,751	1,151	1,050	0,984	0,208	1,120	0,802	0,318	0,120	0,517	0,526
0,988	0,711	1,162	0,954	0,227	0,150	1,067	0,916	0,131	0,564	0,591
0,928	0,533	0,798	0,753	0,201	0,870	1,092	0,222	0,116	0,500	0,663
0,602	0,880	0,525	0,669	0,186	0,358	1,130	0,772	0,108	0,463	0,692
0,622	0,618	0,768	0,669	0,085	0,551	0,604	1,154	0,049	0,212	0,316
0,672	0,365	0,616	0,551	0,163	0,739	1,138	0,399	0,094	0,406	0,736
0,652	0,243	0,434	0,443	0,204	1,021	0,978	0,043	0,118	0,507	0,145
0,405	0,431	0,444	0,427	0,020	1,083	0,195	0,888	0,012	0,050	0,117
0,494	0,384	0,424	0,434	0,056	1,076	0,901	0,174	0,032	0,138	0,319
0,573	0,243	0,364	0,393	0,167	1,077	0,899	0,178	0,096	0,414	0,053
0,365	0,084	0,131	0,194	0,151	1,141	0,727	0,414	0,087	0,374	0,931
0,800	0	0,343	0,381	0,401	1,044	0,950	0,094	0,232	0,996	0,614
0,395	0	0,273	0,223	0,202	0,853	1,101	0,248	0,117	0,502	0,256
0,168	0	0,232	0,133	0,120	0,288	1,112	0,825	0,069	0,298	0,232

Таблица Г.2 – Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения влаги из веток берёзы (Т=353 К)

Массовая скорость испарения · 10 ⁵ , кг/(м ² ·с)			$\bar{W} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	${}^n S \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	v_{k1}	v_{k2}	v_{k3}	${}^n S_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$\Delta W \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	δ_W
W_1	W_2	W_3								
11,738	12,034	9,437	11,070	1,422	0,470	0,678	1,148	0,821	3,530	0,319
15,168	14,618	11,993	13,926	1,697	0,732	0,408	1,139	0,980	4,212	0,302
9,708	10,482	8,854	9,681	0,814	0,032	0,983	1,016	0,470	2,021	0,209
10,723	11,359	9,624	10,569	0,878	0,176	0,901	1,076	0,507	2,179	0,206
8,972	8,524	8,124	8,540	0,424	1,018	0,037	0,981	0,245	1,053	0,123
6,009	6,085	5,153	5,749	0,518	0,503	0,649	1,152	0,299	1,285	0,224
7,138	6,422	5,449	6,336	0,848	0,946	0,101	1,047	0,490	2,105	0,332
4,994	3,529	3,613	4,045	0,822	1,153	0,627	0,526	0,475	2,042	0,505
3,067	2,121	1,885	2,358	0,625	1,134	0,378	0,756	0,361	1,552	0,658
3,864	1,707	1,708	2,426	1,245	1,155	0,578	0,577	0,719	3,092	0,274
2,227	0,646	0,918	1,264	0,846	1,140	0,731	0,409	0,488	2,099	0,661
1,357	0,434	0,434	0,742	0,533	1,155	0,578	0,577	0,308	1,323	0,784
1,823	0,405	0,513	0,914	0,790	1,152	0,645	0,507	0,456	1,960	0,145
0,932	0,135	0,306	0,458	0,420	1,131	0,769	0,362	0,242	1,042	0,277
0,445	0,183	0,128	0,252	0,170	1,139	0,408	0,732	0,098	0,421	0,668
0,352	0,222	0,158	0,244	0,099	1,093	0,224	0,869	0,057	0,246	0,008
0,363	0,077	0	0,147	0,191	1,131	0,364	0,767	0,110	0,474	0,235
0,155	0,048	0	0,068	0,080	1,100	0,247	0,853	0,046	0,197	0,910

Таблица Г.3 – Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения влаги из веток берёзы (Т=373 К)

Массовая скорость испарения · 10 ⁵ , кг/(м ² ·с)			$\bar{W} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	${}^n S \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	v_{k1}	v_{k2}	v_{k3}	${}^n S_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$\Delta W \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	δ_W
W_1	W_2	W_3								
17,817	18,710	19,090	18,539	0,654	1,105	0,262	0,843	0,377	1,623	0,088
23,565	24,141	24,034	23,913	0,307	1,137	0,744	0,393	0,177	0,761	0,032
20,754	18,410	18,443	19,203	1,344	1,155	0,589	0,565	0,776	3,336	0,174
14,953	16,449	9,709	13,704	3,539	0,353	0,776	1,129	2,043	8,787	0,641
5,345	8,108	1,442	4,965	3,349	0,113	0,938	1,052	1,934	8,315	0,675
1,559	4,668	0,647	2,291	2,108	0,347	1,127	0,780	1,217	5,234	0,284
0,297	0,802	0,109	0,403	0,358	0,296	1,114	0,819	0,207	0,889	0,208
0,244	0,348	0,090	0,227	0,130	0,129	0,929	1,058	0,075	0,323	0,421
0,106	0,184	0,040	0,110	0,072	0,052	1,025	0,973	0,042	0,179	0,627
0,095	0,029	0	0,041	0,049	1,103	0,255	0,848	0,028	0,121	0,929
0,011	0,135	0	0,049	0,075	0,505	1,152	0,646	0,043	0,187	0,841

Таблица Г.4 – Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения влаги из веток берёзы (Т=393 К)

Массовая скорость испарения · 10 ⁵ , кг/(м ² ·с)			$\bar{W} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	${}^n S \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	v_{k1}	v_{k2}	v_{k3}	${}^n S_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$\Delta W \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	δ_W
W_1	W_2	W_3								
36,558	33,701	34,486	34,915	1,476	1,113	0,823	0,291	0,852	3,665	0,105
39,434	39,454	43,807	40,898	2,519	0,581	0,573	1,155	1,454	6,254	0,153
15,005	17,907	19,630	17,514	2,338	1,073	0,168	0,905	1,350	5,804	0,331
1,019	1,865	2,060	1,648	0,553	1,137	0,392	0,745	0,319	1,373	0,833
0,474	0,489	0,302	0,421	0,104	0,507	0,645	1,152	0,060	0,258	0,613
0,343	0,419	0,427	0,396	0,046	1,151	0,491	0,659	0,027	0,114	0,289
0,182	0,219	0,166	0,189	0,027	0,276	1,109	0,833	0,016	0,068	0,358
0,222	0,289	0,270	0,261	0,035	1,112	0,825	0,287	0,020	0,086	0,330
0,111	0,229	0,156	0,165	0,060	0,912	1,069	0,158	0,034	0,148	0,896
0,131	0,130	0,166	0,142	0,021	0,540	0,614	1,154	0,012	0,052	0,363

Таблица Г.5 – Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения влаги из веток липы (Т=333 К)

Массовая скорость испарения · 10 ⁵ , кг/(м ² ·с)			$\bar{W} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	${}^n S \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	v_{k1}	v_{k2}	v_{k3}	${}^n S_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$\Delta W \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	δ_W
W_1	W_2	W_3								
9,128	6,607	7,050	7,595	1,346	1,139	0,734	0,405	0,777	3,341	0,440
12,297	8,291	7,503	9,364	2,571	1,141	0,417	0,724	1,484	6,383	0,682
7,969	6,189	5,535	6,564	1,260	1,115	0,298	0,817	0,727	3,128	0,476
4,369	7,305	7,566	6,413	1,775	1,152	0,502	0,649	1,025	4,407	0,687
7,241	7,016	7,019	7,092	0,129	1,155	0,588	0,566	0,075	0,321	0,045
6,656	4,504	4,777	5,313	1,172	1,147	0,690	0,457	0,676	2,909	0,547
3,877	6,218	6,366	5,487	1,397	1,153	0,524	0,629	0,806	3,467	0,632
4,513	6,368	6,671	5,851	1,169	1,145	0,443	0,702	0,675	2,901	0,496
4,851	4,345	4,546	4,581	0,255	1,061	0,925	0,137	0,147	0,633	0,138
2,974	4,893	4,567	4,145	1,027	1,140	0,729	0,411	0,593	2,549	0,615
2,667	5,860	5,945	4,824	1,869	1,154	0,554	0,600	1,079	4,639	0,962
3,138	4,026	4,167	3,777	0,558	1,145	0,446	0,699	0,322	1,384	0,367
1,867	3,568	2,831	2,755	0,853	1,041	0,953	0,089	0,492	2,118	0,769
1,026	4,843	4,398	3,422	2,088	1,148	0,681	0,468	1,205	5,183	0,514
1,303	3,807	3,472	2,861	1,360	1,146	0,696	0,450	0,785	3,375	0,180
0,820	2,222	1,999	1,681	0,753	1,142	0,719	0,423	0,435	1,870	0,113
0,379	3,299	2,357	2,012	1,490	1,096	0,864	0,232	0,860	3,699	0,839
0,379	2,641	2,483	1,835	1,263	1,152	0,639	0,514	0,729	3,135	0,709
0,533	1,535	1,515	1,194	0,573	1,155	0,594	0,560	0,331	1,422	0,190
0,215	0,977	1,021	0,738	0,453	1,153	0,528	0,625	0,261	1,124	0,524
0,195	1,315	1,294	0,935	0,641	1,155	0,594	0,561	0,370	1,591	0,702
0	0,588	0,747	0,445	0,394	1,131	0,363	0,768	0,227	0,977	0,195
0	0,508	0,368	0,292	0,263	1,113	0,823	0,290	0,152	0,652	0,231
0	0,169	0,421	0,197	0,212	0,929	0,129	1,058	0,122	0,526	0,672

Таблица Г.6 – Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения влаги из веток липы (Т=353 К)

Массовая скорость испарения · 10 ⁵ , кг/(м ² ·с)			$\bar{W} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	${}^n S \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	v_{k1}	v_{k2}	v_{k3}	${}^n S_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$\Delta W \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	δ_W
W_1	W_2	W_3								
17,216	18,193	12,795	16,068	2,876	0,399	0,739	1,138	1,661	7,140	0,444
20,733	22,826	16,612	20,057	3,162	0,214	0,876	1,090	1,825	7,849	0,391
15,677	15,251	12,021	14,317	1,999	0,681	0,468	1,148	1,154	4,963	0,347
17,225	17,157	12,510	15,630	2,703	0,590	0,565	1,155	1,560	6,710	0,429
11,562	12,188	9,256	11,002	1,544	0,363	0,768	1,131	0,892	3,834	0,349
12,028	7,472	6,711	8,737	2,876	1,145	0,440	0,705	1,660	7,139	0,817
7,359	6,099	6,518	6,659	0,642	1,092	0,872	0,220	0,371	1,594	0,239
2,787	1,634	3,595	2,672	0,985	0,117	1,053	0,937	0,569	2,447	0,916
3,007	1,541	2,056	2,201	0,744	1,083	0,888	0,196	0,429	1,847	0,839
0,721	0,925	1,493	1,046	0,400	0,813	0,304	1,117	0,231	0,994	0,950
0,255	0,121	0,608	0,328	0,252	0,291	0,822	1,113	0,145	0,625	0,903
0,827	0,439	0,304	0,523	0,271	1,118	0,311	0,808	0,157	0,673	0,287
0,026	0,177	0,313	0,172	0,144	1,017	0,035	0,982	0,083	0,356	0,068
0	0	0,111	0,037	0,064	0,577	0,577	1,155	0,037	0,159	0,300

Таблица Г.7 – Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения влаги из веток липы (Т=373 К)

Массовая скорость испарения · 10 ⁵ , кг/(м ² ·с)			$\bar{W} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	${}^n S \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	v_{k1}	v_{k2}	v_{k3}	${}^n S_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$\Delta W \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	δ_W
W_1	W_2	W_3								
28,565	31,453	25,691	28,570	2,881	0,002	1,001	0,999	1,663	7,153	0,250
30,760	32,584	33,886	32,410	1,571	1,051	0,111	0,940	0,907	3,899	0,120
17,794	18,682	19,260	18,579	0,738	1,062	0,139	0,923	0,426	1,833	0,099
8,325	4,802	10,870	7,999	3,047	0,107	1,049	0,942	1,759	7,564	0,946
0,745	0,347	1,310	0,801	0,484	0,115	0,938	1,052	0,279	1,201	0,500
0,262	0,336	0,433	0,344	0,086	0,950	0,093	1,043	0,049	0,212	0,618
0,073	0,056	0,195	0,108	0,076	0,458	0,689	1,147	0,044	0,188	0,737
0,105	0,090	0,130	0,108	0,020	0,155	0,913	1,069	0,012	0,051	0,468
0,126	0	0,130	0,085	0,074	0,551	1,154	0,604	0,043	0,183	0,151
0,063	0	0,011	0,025	0,034	1,140	0,731	0,409	0,019	0,084	0,398

Таблица Г.8 – Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения влаги из веток липы (Т=393 К)

Массовая скорость испарения · 10 ⁵ , кг/(м ² ·с)			$\bar{W} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	${}^nS \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	v_{k1}	v_{k2}	v_{k3}	${}^nS_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$\Delta W \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	δ_W
W_1	W_2	W_3								
33,892	39,028	30,606	34,509	4,245	0,145	1,065	0,919	2,451	10,538	0,305
35,428	37,561	40,368	37,785	2,478	0,952	0,091	1,042	1,430	6,151	0,163
18,730	19,678	19,197	19,202	0,474	0,995	1,005	0,009	0,274	1,177	0,061
1,905	2,627	2,414	2,315	0,371	1,106	0,840	0,266	0,214	0,921	0,398
0,583	0,533	0,344	0,487	0,126	0,765	0,367	1,132	0,073	0,314	0,645
0,476	0,196	0,423	0,365	0,149	0,748	1,136	0,388	0,086	0,369	0,011
0,243	0,262	0,141	0,215	0,065	0,427	0,716	1,143	0,038	0,161	0,750
0,350	0,178	0,167	0,232	0,103	1,153	0,527	0,626	0,059	0,255	0,099
0,165	0,168	0,167	0,167	0,002	1,109	0,834	0,274	0,001	0,004	0,023
0,253	0,150	0,088	0,163	0,083	1,073	0,167	0,906	0,048	0,206	0,263
0,146	0,140	0,123	0,136	0,012	0,799	0,322	1,121	0,007	0,029	0,213

Таблица Г.9 – Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения влаги из веток тополя (Т=333 К)

Массовая скорость испарения · 10 ⁵ , кг/(м ² ·с)			$\bar{W} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	${}^nS \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	v_{k1}	v_{k2}	v_{k3}	${}^nS_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$\Delta W \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	δ_W
W_1	W_2	W_3								
16,265	8,643	7,312	10,740	4,831	1,144	0,434	0,710	2,789	1,993	0,117
13,466	15,931	9,734	13,044	3,120	0,135	0,925	1,061	1,802	7,747	0,594
8,404	5,029	7,636	7,023	1,769	0,781	1,127	0,346	1,021	4,391	0,625
3,753	5,908	5,655	5,106	1,178	1,148	0,682	0,466	0,680	2,924	0,573
4,972	6,181	4,970	5,374	0,699	0,576	1,155	0,578	0,403	1,734	0,323
5,103	4,721	6,420	5,415	0,891	0,350	0,778	1,128	0,515	2,213	0,409
2,478	4,088	5,439	4,002	1,482	1,028	0,059	0,969	0,856	3,680	0,920
2,692	5,267	4,061	4,006	1,288	1,021	0,978	0,042	0,744	3,198	0,798
4,198	4,466	4,547	4,404	0,183	1,126	0,342	0,784	0,106	0,454	0,103
2,445	3,315	4,871	3,544	1,229	0,894	0,186	1,080	0,710	3,052	0,861
0,568	3,491	3,764	2,607	1,772	1,151	0,498	0,653	1,023	4,398	0,687
2,807	3,983	2,980	3,257	0,635	0,709	1,144	0,435	0,367	1,576	0,484
2,906	3,139	3,620	3,221	0,364	0,867	0,227	1,094	0,210	0,904	0,281
0,403	2,400	3,350	2,051	1,504	1,096	0,232	0,863	0,868	3,734	0,820
1,087	3,025	2,494	2,202	1,002	1,114	0,821	0,292	0,578	2,486	0,129
2,231	2,972	2,179	2,460	0,444	0,518	1,153	0,635	0,256	1,101	0,448
2,091	2,260	2,656	2,336	0,290	0,843	0,262	1,105	0,168	0,721	0,309
1,424	1,873	2,233	1,843	0,405	1,034	0,073	0,962	0,234	1,006	0,546
1,226	2,453	1,630	1,770	0,625	0,869	1,093	0,224	0,361	1,552	0,877
1,473	2,145	1,693	1,770	0,343	0,867	1,094	0,227	0,198	0,851	0,480
1,128	1,460	1,855	1,481	0,364	0,970	0,058	1,028	0,210	0,904	0,610
0,634	1,451	1,315	1,133	0,438	1,141	0,726	0,415	0,253	1,087	0,959
0,815	1,776	1,008	1,200	0,508	0,757	1,134	0,376	0,293	1,262	0,052
0,749	1,319	0,810	0,959	0,313	0,673	1,149	0,476	0,181	0,776	0,809
0,527	0,826	0,918	0,757	0,205	1,125	0,338	0,787	0,118	0,508	0,671
0,296	1,029	0,846	0,724	0,381	1,121	0,800	0,322	0,220	0,947	0,308
0,428	0,994	0,513	0,645	0,305	0,711	1,143	0,432	0,176	0,757	0,174
0,403	0,756	0,414	0,525	0,201	0,604	1,154	0,550	0,116	0,498	0,950
0,173	0,457	0,585	0,405	0,211	1,100	0,247	0,854	0,122	0,524	0,294
0,173	0,598	0,468	0,413	0,218	1,102	0,849	0,254	0,126	0,541	0,309
0,189	0,554	0,288	0,344	0,189	0,819	1,114	0,295	0,109	0,468	0,362
0,222	0,325	0,279	0,276	0,052	1,033	0,964	0,069	0,030	0,128	0,465
0,074	0,299	0,360	0,244	0,151	1,131	0,362	0,769	0,087	0,374	0,530
0,132	0,281	0,144	0,186	0,083	0,650	1,151	0,501	0,048	0,206	0,110
0,165	0,264	0,153	0,194	0,061	0,480	1,149	0,670	0,035	0,151	0,779
0,074	0,237	0,162	0,158	0,082	1,025	0,973	0,052	0,047	0,203	0,286
0,074	0,211	0,225	0,170	0,083	1,151	0,491	0,660	0,048	0,207	0,218
0,091	0,237	0,090	0,139	0,085	0,574	1,155	0,580	0,049	0,211	0,513
0,091	0,123	0,036	0,083	0,044	0,167	0,906	1,073	0,025	0,109	0,313
0,099	0,079	0	0,059	0,052	0,755	0,379	1,134	0,030	0,130	0,189

Таблица Г.10 – Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения влаги из веток тополя (Т=353 К)

Массовая скорость испарения · 10 ⁵ , кг/(м ² ·с)			$\bar{W} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	${}^n S \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	v_{k1}	v_{k2}	v_{k3}	${}^n S_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$\Delta W \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	δ_W
W_1	W_2	W_3								
12,712	16,316	14,394	14,474	1,803	0,977	1,021	0,044	1,041	4,477	0,309
14,512	17,953	15,967	16,144	1,727	0,945	1,047	0,102	0,997	4,288	0,266
11,978	13,297	12,110	12,462	0,726	0,666	1,150	0,484	0,419	1,803	0,145
13,862	13,903	12,614	13,459	0,733	0,549	0,605	1,154	0,423	1,819	0,135
11,353	10,363	9,584	10,433	0,887	1,037	0,079	0,958	0,512	2,201	0,211
9,736	8,082	7,561	8,460	1,135	1,124	0,332	0,791	0,656	2,819	0,333
10,594	7,751	7,300	8,549	1,786	1,145	0,447	0,699	1,031	4,434	0,519
7,935	4,429	4,603	5,656	1,976	1,154	0,621	0,533	1,141	4,906	0,867
7,294	3,275	4,010	4,859	2,140	1,138	0,741	0,397	1,236	5,313	0,093
7,377	2,461	3,443	4,427	2,602	1,134	0,756	0,378	1,502	6,459	0,459
4,776	0,899	1,897	2,524	2,013	1,119	0,807	0,311	1,162	4,998	0,980
4,485	0,662	1,708	2,285	1,975	1,114	0,821	0,292	1,140	4,904	0,146
3,659	0,454	1,205	1,773	1,676	1,125	0,787	0,339	0,968	4,162	0,348
0,867	0,208	0,459	0,511	0,332	1,070	0,911	0,158	0,192	0,825	0,615
1,842	0,104	0,584	0,844	0,898	1,113	0,824	0,289	0,518	2,228	0,641
0,742	0,123	0,297	0,387	0,319	1,111	0,828	0,284	0,184	0,792	0,047
0,083	0,009	0,144	0,079	0,067	0,066	1,032	0,965	0,039	0,167	0,118
0,433	0,000	0,189	0,207	0,217	1,040	0,954	0,086	0,125	0,540	0,601
0,192	0	0,117	0,103	0,097	0,920	1,065	0,145	0,056	0,240	0,332

Таблица Г.11 – Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения влаги из веток тополя (T=373 K)

Массовая скорость испарения · 10 ⁵ , кг/(м ² ·с)			$\bar{W} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	${}^nS \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	v_{k1}	v_{k2}	v_{k3}	${}^nS_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$\Delta W \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	δ_W
W_1	W_2	W_3								
20,069	20,755	24,716	21,847	2,509	0,709	0,435	1,144	1,448	6,228	0,285
26,508	22,035	26,011	24,851	2,452	0,676	1,149	0,473	1,416	6,087	0,245
21,579	17,051	19,041	19,224	2,269	1,038	0,957	0,080	1,310	5,634	0,293
21,579	15,771	14,505	17,285	3,772	1,138	0,401	0,737	2,178	9,365	0,542
12,740	9,516	7,848	10,035	2,487	1,088	0,209	0,879	1,436	6,175	0,615
10,185	7,737	4,754	7,559	2,720	0,966	0,065	1,031	1,570	6,753	0,893
5,093	3,172	2,885	3,717	1,200	1,146	0,454	0,693	0,693	2,980	0,802
1,657	1,417	1,921	1,665	0,252	0,030	0,984	1,015	0,145	0,625	0,376
0,665	0,717	0,539	0,640	0,091	0,270	0,837	1,107	0,053	0,227	0,354
0,138	0,258	0,252	0,216	0,067	1,154	0,618	0,535	0,039	0,167	0,775
0,199	0,314	0,165	0,226	0,078	0,350	1,128	0,778	0,045	0,194	0,858
0,138	0,225	0,113	0,159	0,059	0,351	1,128	0,777	0,034	0,147	0,922
0,104	0,129	0,070	0,101	0,030	0,099	0,947	1,046	0,017	0,074	0,734
0,155	0,225	0,087	0,156	0,069	0,008	1,004	0,996	0,040	0,172	0,103
0,155	0,072	0,078	0,102	0,046	1,152	0,638	0,514	0,027	0,115	0,127
0,121	0,121	0,070	0,104	0,030	0,579	0,576	1,155	0,017	0,073	0,709
0,147	0,105	0,043	0,098	0,052	0,933	0,123	1,056	0,030	0,129	0,312

Таблица Г.12 – Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения влаги из веток тополя (T=393 K)

Массовая скорость испарения · 10 ⁵ , кг/(м ² ·с)			$\bar{W} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	${}^nS \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	v_{k1}	v_{k2}	v_{k3}	${}^nS_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$\Delta W \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	δ_W
W_1	W_2	W_3								
30,930	34,379	35,659	33,656	2,446	1,114	0,295	0,819	1,412	6,073	0,180
33,221	22,692	38,262	31,392	7,944	0,230	1,095	0,865	4,587	19,723	0,628
21,552	31,741	34,214	29,169	6,711	1,135	0,383	0,752	3,875	16,661	0,571
9,412	18,400	26,891	18,234	8,741	1,009	0,019	0,990	5,047	5,700	0,190
2,951	4,520	6,156	4,542	1,603	0,993	0,014	1,007	0,925	3,978	0,876
0,798	0,955	1,259	1,004	0,235	0,879	0,209	1,088	0,135	0,582	0,580
0,480	0,529	0,550	0,520	0,036	1,105	0,262	0,843	0,021	0,089	0,171
0,420	0,293	0,616	0,443	0,162	0,139	0,923	1,062	0,094	0,403	0,910
0,352	0,246	0,252	0,283	0,060	1,153	0,627	0,526	0,034	0,148	0,522
0,223	0,303	0,364	0,296	0,071	1,040	0,086	0,954	0,041	0,175	0,591
0,172	0,161	0,037	0,123	0,075	0,649	0,503	1,152	0,043	0,185	0,503
0,249	0,123	0,317	0,230	0,099	0,195	1,083	0,888	0,057	0,245	0,065
0,180	0,104	0,084	0,123	0,051	1,132	0,368	0,764	0,029	0,126	0,027
0,086	0	0,149	0,078	0,075	0,099	1,046	0,947	0,043	0,186	0,373
0,129	0	0,093	0,074	0,066	0,823	1,113	0,290	0,038	0,165	0,231

Таблица Г.13 – Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения влаги из листьев берёзы (Т=333 К)

Массовая скорость испарения · 10 ⁵ , кг/(м ² ·с)			$\bar{W} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	${}^n S \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	v_{k1}	v_{k2}	v_{k3}	${}^n S_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$\Delta W \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	δ_W
W_1	W_2	W_3								
6,897	10,115	10,115	9,042	1,858	1,155	0,577	0,577	1,073	4,613	0,510
6,897	9,655	9,195	8,582	1,478	1,141	0,726	0,415	0,853	3,669	0,428
7,356	8,276	7,816	7,816	0,460	1,000	1,000	0,000	0,265	1,141	0,146
6,437	7,356	7,356	7,050	0,531	1,155	0,577	0,577	0,307	1,318	0,187
6,437	7,356	6,897	6,897	0,460	1,000	1,000	0,000	0,265	1,141	0,166
6,437	6,897	7,356	6,897	0,460	1,000	0,000	1,000	0,265	1,141	0,166
6,437	6,437	6,437	6,437	0	0	0	0	0	0	0
5,977	6,437	6,437	6,284	0,265	1,155	0,577	0,577	0,153	0,659	0,105
5,977	5,977	5,977	5,977	0,000	0,606	1,125	0,606	0,000	0,000	0,000
5,057	5,517	5,517	5,364	0,265	1,155	0,577	0,577	0,153	0,659	0,123
5,057	5,517	5,517	5,364	0,265	1,155	0,577	0,577	0,153	0,659	0,123
5,057	5,057	5,517	5,211	0,265	0,577	0,577	1,155	0,153	0,659	0,126
5,057	5,057	4,598	4,904	0,265	0,577	0,577	1,155	0,153	0,659	0,134
4,598	4,598	5,057	4,751	0,265	0,577	0,577	1,155	0,153	0,659	0,139
4,138	4,138	4,598	4,291	0,265	0,577	0,577	1,155	0,153	0,659	0,154
4,138	4,138	4,598	4,291	0,265	0,577	0,577	1,155	0,153	0,659	0,154
4,138	3,678	4,138	3,985	0,265	0,577	1,155	0,577	0,153	0,659	0,165
4,138	3,678	4,138	3,985	0,265	0,577	1,155	0,577	0,153	0,659	0,165
3,678	3,218	3,218	3,372	0,265	1,155	0,577	0,577	0,153	0,659	0,195
3,678	2,759	3,218	3,218	0,460	1,000	1,000	0,000	0,265	1,141	0,355
3,218	2,759	3,218	3,065	0,265	0,577	1,155	0,577	0,153	0,659	0,215
3,218	2,759	3,218	3,065	0,265	0,577	1,155	0,577	0,153	0,659	0,215
2,759	2,299	2,759	2,605	0,265	0,577	1,155	0,577	0,153	0,659	0,253
2,759	2,299	2,759	2,605	0,265	0,577	1,155	0,577	0,153	0,659	0,253
2,759	1,839	2,299	2,299	0,460	1,000	1,000	0,000	0,265	1,141	0,497
2,299	1,839	1,839	1,992	0,265	1,155	0,577	0,577	0,153	0,659	0,331
2,299	1,379	1,839	1,839	0,460	1,000	1,000	0,000	0,265	1,141	0,621
1,839	1,379	1,379	1,533	0,265	1,155	0,577	0,577	0,153	0,659	0,430
1,839	1,379	1,379	1,533	0,265	1,155	0,577	0,577	0,153	0,659	0,430
1,379	0,920	0,920	1,073	0,265	1,155	0,577	0,577	0,153	0,659	0,614
0,920	1,379	0,920	1,073	0,265	0,577	1,155	0,577	0,153	0,659	0,614
0,920	0,460	0,460	0,613	0,265	1,155	0,577	0,577	0,153	0,659	0,075
0,460	0,920	0,460	0,613	0,265	0,577	1,155	0,577	0,153	0,659	0,075
0,460	0,460	0,460	0,460	0	0	0	0	0	0	0
0,460	0,460	0	0,307	0,265	0,577	0,577	1,155	0,153	0,659	0,150

Таблица Г.14 – Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения влаги из листьев берёзы (Т=353 К)

Массовая скорость испарения · 10 ⁵ , кг/(м ² ·с)			$\bar{W} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	${}^n S \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	v_{k1}	v_{k2}	v_{k3}	${}^n S_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$\Delta W \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	δ_W
W_1	W_2	W_3								
12,414	13,333	14,713	13,487	1,157	0,927	0,132	1,060	0,668	2,873	0,213
12,414	14,253	13,333	13,333	0,920	1,000	1,000	0,000	0,531	2,283	0,171
11,954	11,954	11,954	11,954	0,000	0,518	0,518	1,209	0,000	0,000	0,000
11,494	11,494	11,034	11,341	0,265	0,577	0,577	1,155	0,153	0,659	0,058
10,575	10,575	9,195	10,115	0,796	0,577	0,577	1,155	0,460	1,977	0,195
9,655	10,115	8,736	9,502	0,702	0,218	0,873	1,091	0,405	1,744	0,183
8,736	9,655	7,816	8,736	0,920	0,000	1,000	1,000	0,531	2,283	0,261
8,276	8,736	6,897	7,969	0,957	0,320	0,801	1,121	0,553	2,376	0,298
7,356	7,816	6,437	7,203	0,702	0,218	0,873	1,091	0,405	1,744	0,242
6,897	7,816	5,517	6,743	1,157	0,132	0,927	1,060	0,668	2,873	0,426
6,897	6,897	6,897	6,897	0	0	0	0	0	0	0
5,517	5,977	4,138	5,211	0,957	0,320	0,801	1,121	0,553	2,376	0,456
5,517	5,057	4,138	4,904	0,702	0,873	0,218	1,091	0,405	1,744	0,356
4,598	4,138	2,759	3,831	0,957	0,801	0,320	1,121	0,553	2,376	0,620
3,678	3,678	2,759	3,372	0,531	0,577	0,577	1,155	0,307	1,318	0,391
3,218	2,299	2,299	2,605	0,531	1,155	0,577	0,577	0,307	1,318	0,506
2,299	1,839	1,379	1,839	0,460	1,000	0,000	1,000	0,265	1,141	0,621
1,379	1,379	1,379	1,379	0	0	0	0	0	0	0
0,460	0,920	0,460	0,613	0,265	0,577	1,155	0,577	0,153	0,659	0,075
0,460	0,460	0,920	0,613	0,265	0,577	0,577	1,155	0,153	0,659	0,075
0,460	0,460	0,920	0,613	0,265	0,577	0,577	1,155	0,153	0,659	0,075

Таблица Г.15 – Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения влаги из листьев берёзы (Т=373 К)

Массовая скорость испарения · 10 ⁵ , кг/(м ² ·с)			$\bar{W} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	${}^n S \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	v_{k1}	v_{k2}	v_{k3}	${}^n S_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$\Delta W \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	δ_W
W_1	W_2	W_3								
22,989	20,690	22,529	22,069	1,216	0,756	1,134	0,378	0,702	3,020	0,137
19,310	22,989	24,828	22,375	2,809	1,091	0,218	0,873	1,622	6,974	0,312
17,471	19,770	18,851	18,697	1,157	1,060	0,927	0,132	0,668	2,873	0,154
15,632	16,092	16,092	15,939	0,265	1,155	0,577	0,577	0,153	0,659	0,041
13,333	11,954	12,874	12,720	0,702	0,873	1,091	0,218	0,405	1,744	0,137
11,954	12,414	11,034	11,801	0,702	0,218	0,873	1,091	0,405	1,744	0,148
9,655	8,736	9,195	9,195	0,460	1,000	1,000	0,000	0,265	1,141	0,124
8,276	6,897	6,437	7,203	0,957	1,121	0,320	0,801	0,553	2,376	0,330
6,897	4,598	4,138	5,211	1,478	1,141	0,415	0,726	0,853	3,669	0,704
4,138	3,218	3,218	3,525	0,531	1,155	0,577	0,577	0,307	1,318	0,374
2,759	1,839	1,839	2,146	0,531	1,155	0,577	0,577	0,307	1,318	0,614
0,920	0,920	0,460	0,766	0,265	0,577	0,577	1,155	0,153	0,659	0,860
0,460	0,460	0,460	0,460	0,000	0	0	0	0	0	0

Таблица Г.16 – Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения влаги из листьев берёзы (T=393 K)

Массовая скорость испарения · 10 ⁵ , кг/(м ² ·с)			$\bar{W} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	${}^n S \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	v_{k1}	v_{k2}	v_{k3}	${}^n S_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$\Delta W \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	δ_W
W_1	W_2	W_3								
28,506	28,046	27,126	27,893	0,702	0,873	0,218	1,091	0,405	1,744	0,063
31,264	32,184	28,506	30,651	1,914	0,320	0,801	1,121	1,105	4,752	0,155
26,667	25,747	23,908	25,441	1,405	0,873	0,218	1,091	0,811	3,487	0,137
22,529	20,230	19,770	20,843	1,478	1,141	0,415	0,726	0,853	3,669	0,176
17,471	15,172	16,092	16,245	1,157	1,060	0,927	0,132	0,668	2,873	0,177
11,034	11,034	12,414	11,494	0,796	0,577	0,577	1,155	0,460	1,977	0,172
5,517	6,897	8,276	6,897	1,379	1,000	0,000	1,000	0,796	3,424	0,497
1,839	5,057	4,138	3,678	1,658	1,109	0,832	0,277	0,957	4,115	0,119
0,460	1,839	2,759	1,686	1,157	1,060	0,132	0,927	0,668	2,873	0,704
0,460	0,460	0,920	0,613	0,265	0,577	0,577	1,155	0,153	0,659	0,075
0,460	0,460	0,460	0,460	0,000	1,166	0,566	0,566	0,000	0,000	0,000
0,000	0,460	0,460	0,307	0,265	1,155	0,577	0,577	0,153	0,659	0,150
0,460	0,000	0,460	0,307	0,265	0,577	1,155	0,577	0,153	0,659	0,150

Таблица Г.17 – Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения влаги из листьев липы (T=333 K)

Массовая скорость испарения · 10 ⁵ , кг/(м ² ·с)			$\bar{W} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	${}^n S \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	v_{k1}	v_{k2}	v_{k3}	${}^n S_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$\Delta W \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	δ_W
W_1	W_2	W_3								
15,274	15,522	14,078	14,958	0,772	0,409	0,731	1,140	0,446	1,916	0,128
15,853	15,126	14,290	15,090	0,782	0,976	0,047	1,023	0,452	1,942	0,129
10,483	10,133	14,271	11,629	2,295	0,500	0,652	1,151	1,325	5,697	0,490
12,248	7,743	14,768	11,586	3,559	0,186	1,080	0,894	2,055	8,836	0,763
14,851	13,811	10,189	12,950	2,447	0,776	0,352	1,128	1,413	6,076	0,469
10,253	13,269	8,506	10,676	2,410	0,176	1,076	0,901	1,391	5,982	0,560
7,062	8,864	12,037	9,321	2,519	0,897	0,181	1,078	1,454	6,253	0,671
8,947	6,409	9,057	8,138	1,498	0,540	1,154	0,614	0,865	3,719	0,457
8,478	8,405	6,005	7,629	1,407	0,603	0,551	1,154	0,813	3,494	0,458
5,683	7,163	4,818	5,888	1,186	0,173	1,075	0,902	0,685	2,944	0,500
5,618	5,048	6,979	5,882	0,992	0,266	0,840	1,106	0,573	2,463	0,419
6,593	6,989	5,278	6,287	0,895	0,342	0,784	1,126	0,517	2,223	0,354
4,313	7,255	3,117	4,895	2,130	0,273	1,108	0,835	1,229	5,287	0,080
3,062	4,414	3,310	3,595	0,720	0,741	1,137	0,396	0,415	1,786	0,497
4,285	2,492	3,356	3,378	0,897	1,012	0,988	0,024	0,518	2,226	0,659
2,492	3,356	1,416	2,421	0,972	0,073	0,962	1,034	0,561	2,413	0,997
0,717	2,069	0,634	1,140	0,805	0,525	1,153	0,628	0,465	1,999	0,754
0,726	0,754	0,432	0,638	0,178	0,498	0,653	1,151	0,103	0,443	0,695
0,276	0,478	0,202	0,319	0,143	0,300	1,116	0,815	0,082	0,355	0,113
0,166	0,101	0,083	0,116	0,043	1,129	0,353	0,776	0,025	0,108	0,926
0,092	0,055	0,074	0,074	0,018	1,000	1,000	0,000	0,011	0,046	0,621
0,009	0,037	0,055	0,034	0,023	1,060	0,132	0,927	0,013	0,057	0,704
0,028	0,000	0,018	0,015	0,014	0,873	1,091	0,218	0,008	0,035	0,275

Таблица Г.18 – Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения влаги из листьев липы (T=353 K)

Массовая скорость испарения · 10 ⁵ , кг/(м ² ·с)			$\bar{W} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	${}^nS \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	v_{k1}	v_{k2}	v_{k3}	${}^nS_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$\Delta W \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	δ_W
W_1	W_2	W_3								
27,080	25,324	24,929	25,778	1,145	1,137	0,396	0,741	0,661	2,843	0,110
25,039	28,267	27,034	26,780	1,629	1,069	0,913	0,156	0,940	4,044	0,151
28,083	23,972	21,223	24,426	3,452	1,059	0,131	0,928	1,993	8,571	0,351
17,324	20,993	21,637	19,985	2,326	1,144	0,433	0,710	1,343	5,776	0,289
13,122	18,713	13,876	15,237	3,034	0,697	1,146	0,449	1,752	7,531	0,494
12,285	9,646	12,083	11,338	1,469	0,645	1,152	0,507	0,848	3,646	0,322
6,510	5,278	10,749	7,513	2,870	0,349	0,779	1,128	1,657	7,125	0,948
5,370	2,556	4,441	4,123	1,434	0,870	1,092	0,222	0,828	3,559	0,863
3,366	0,432	0,855	1,551	1,586	1,144	0,706	0,439	0,915	3,936	0,538
0,294	0,221	0,791	0,435	0,310	0,455	0,692	1,147	0,179	0,770	0,769
0,064	0,138	0,267	0,156	0,102	0,898	0,180	1,078	0,059	0,254	0,626
0,028	0,092	0,046	0,055	0,033	0,832	1,109	0,277	0,019	0,082	0,492
0,009	0,055	0,028	0,031	0,023	0,927	1,060	0,132	0,013	0,057	0,874

Таблица Г.19 – Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения влаги из листьев липы (T=373 K)

Массовая скорость испарения · 10 ⁵ , кг/(м ² ·с)			$\bar{W} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	${}^nS \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	v_{k1}	v_{k2}	v_{k3}	${}^nS_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$\Delta W \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	δ_W
W_1	W_2	W_3								
44,009	48,708	40,993	44,570	3,888	0,144	1,064	0,920	2,245	9,652	0,217
39,016	42,391	46,041	42,483	3,514	0,987	0,026	1,013	2,029	8,723	0,205
29,223	25,793	24,938	26,651	2,268	1,134	0,378	0,756	1,309	5,630	0,211
18,768	16,386	17,784	17,646	1,197	0,937	1,053	0,115	0,691	2,971	0,168
5,490	3,218	5,885	4,864	1,439	0,434	1,144	0,709	0,831	3,573	0,734
1,076	1,021	1,085	1,061	0,035	0,440	1,145	0,704	0,020	0,086	0,081
0,469	0,221	0,506	0,398	0,155	0,455	1,147	0,692	0,090	0,385	0,966
0,184	0,074	0,184	0,147	0,064	0,577	1,155	0,577	0,037	0,158	0,075
0,101	0,064	0,064	0,077	0,021	1,155	0,577	0,577	0,012	0,053	0,688
0,055	0,037	0,046	0,046	0,009	1,000	1,000	0,000	0,005	0,023	0,497
0,028	0,018	0,009	0,018	0,009	1,000	0,000	1,000	0,005	0,023	0,241

Таблица В.20 – Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения влаги из листьев липы (T=393 K)

Массовая скорость испарения · 10 ⁵ , кг/(м ² ·с)			$\bar{W} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	${}^nS \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	v_{k1}	v_{k2}	v_{k3}	${}^nS_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$\Delta W \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	δ_W
W_1	W_2	W_3								
65,278	68,901	63,200	65,793	2,885	0,178	1,077	0,899	1,666	7,163	0,109
52,432	40,552	53,067	48,684	7,049	0,532	1,154	0,622	4,070	17,501	0,359
18,317	20,156	21,784	20,086	1,734	1,020	0,041	0,979	1,001	4,306	0,214
0,993	2,685	1,977	1,885	0,850	1,050	0,941	0,108	0,491	2,110	0,119
0,478	0,405	0,543	0,475	0,069	0,044	1,021	0,977	0,040	0,171	0,361
0,055	0,202	0,248	0,169	0,101	1,124	0,334	0,790	0,058	0,250	0,485
0,018	1,103	0,101	0,408	0,604	0,645	1,152	0,507	0,349	0,499	0,678
0,000	0,028	0,018	0,015	0,014	1,091	0,873	0,218	0,008	0,035	0,275

Таблица Г.21 – Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения влаги из листьев тополя (Т=333 К)

Массовая скорость испарения · 10 ⁵ , кг/(м ² ·с)			$\bar{W} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	${}^n S \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	v_{k1}	v_{k2}	v_{k3}	${}^n S_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$\Delta W \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	δ_W
W_1	W_2	W_3								
17,333	11,531	8,864	12,576	4,330	1,099	0,241	0,857	2,500	10,750	0,855
20,717	12,975	13,545	15,746	4,315	1,152	0,642	0,510	2,491	10,712	0,680
12,221	14,823	10,262	12,435	2,288	0,094	1,044	0,950	1,321	5,680	0,457
12,257	12,267	12,368	12,297	0,061	0,651	0,501	1,151	0,035	0,152	0,012
13,140	8,368	11,044	10,851	2,392	0,957	1,038	0,081	1,381	5,939	0,547
8,662	10,492	7,917	9,024	1,325	0,273	1,108	0,835	0,765	3,289	0,365
7,274	9,931	9,609	8,938	1,450	1,148	0,685	0,463	0,837	3,601	0,403
9,278	6,703	10,078	8,687	1,763	0,335	1,125	0,789	1,018	4,378	0,504
6,648	7,880	6,869	7,133	0,657	0,737	1,138	0,401	0,379	1,631	0,229
5,067	8,046	6,667	6,593	1,491	1,024	0,974	0,049	0,861	3,702	0,561
6,795	5,094	7,917	6,602	1,421	0,136	1,061	0,925	0,821	3,529	0,534
4,745	2,749	5,453	4,316	1,402	0,306	1,117	0,811	0,809	3,480	0,806
2,133	5,048	3,678	3,620	1,458	1,019	0,979	0,040	0,842	3,620	0,100
4,294	3,531	5,241	4,356	0,857	0,072	0,962	1,034	0,495	2,127	0,488
2,970	0,598	2,694	2,087	1,297	0,680	1,148	0,468	0,749	3,221	0,543
0,211	0,570	2,189	0,990	1,053	0,739	0,399	1,138	0,608	2,615	0,641
0,598	0,653	0,506	0,585	0,074	0,165	0,907	1,072	0,043	0,185	0,315
0,892	0,515	0,083	0,497	0,405	0,977	0,045	1,022	0,234	1,005	0,024
0,055	0,184	0,028	0,089	0,083	0,404	1,139	0,735	0,048	0,207	0,330
0,009	0,046	0,000	0,018	0,024	0,378	1,134	0,756	0,014	0,060	0,284

Таблица Г.22 – Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения влаги из листьев тополя (Т=353 К)

Массовая скорость испарения · 10 ⁵ , кг/(м ² ·с)			$\bar{W} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	${}^n S \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	v_{k1}	v_{k2}	v_{k3}	${}^n S_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$\Delta W \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	δ_W
W_1	W_2	W_3								
27,641	24,910	31,926	28,159	3,537	0,146	0,919	1,065	2,042	8,780	0,312
35,457	27,577	31,917	31,651	3,947	0,965	1,032	0,068	2,279	9,799	0,310
21,563	26,336	23,283	23,727	2,417	0,895	1,079	0,184	1,395	6,001	0,253
13,361	23,182	23,862	20,135	5,876	1,153	0,518	0,634	3,393	14,588	0,725
15,706	13,480	13,628	14,271	1,244	1,153	0,635	0,517	0,718	3,090	0,216
9,223	10,510	8,754	9,496	0,909	0,300	1,116	0,816	0,525	2,258	0,238
3,540	2,667	3,559	3,255	0,510	0,559	1,155	0,595	0,294	1,265	0,389
2,189	0,552	0,451	1,064	0,976	1,153	0,525	0,628	0,563	2,422	2,277
0,451	0,230	0,267	0,316	0,118	1,141	0,726	0,415	0,068	0,294	0,930
0,166	0,028	0,083	0,092	0,069	1,060	0,927	0,132	0,040	0,172	0,874
0,064	0,000	0,018	0,028	0,033	1,109	0,832	0,277	0,019	0,082	0,984

Таблица Г.23 – Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения влаги из листьев тополя (T=373 K)

Массовая скорость испарения · 10 ⁵ , кг/(м ² ·с)			$\bar{W} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	${}^n S \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	v_{k1}	v_{k2}	v_{k3}	${}^n S_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$\Delta W \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	δ_W
W_1	W_2	W_3								
47,789	54,161	59,577	53,842	5,901	1,026	0,054	0,972	3,407	14,649	0,272
47,126	40,966	46,455	44,849	3,380	0,674	1,149	0,475	1,951	8,391	0,187
25,103	28,156	31,834	28,365	3,370	0,968	0,062	1,029	1,946	8,367	0,295
8,313	12,092	9,471	9,959	1,936	0,850	1,102	0,252	1,118	4,807	0,483
3,090	0,653	0,451	1,398	1,469	1,152	0,507	0,645	0,848	3,646	0,609
0,699	0,414	0,221	0,444	0,241	1,058	0,127	0,930	0,139	0,597	0,344
0,239	0,257	0,120	0,205	0,075	0,450	0,696	1,146	0,043	0,186	0,905
0,202	0,147	0,064	0,138	0,069	0,927	0,132	1,060	0,040	0,172	0,250
0,147	0,110	0,046	0,101	0,051	0,898	0,180	1,078	0,030	0,127	0,257
0,074	0,055	0,018	0,049	0,028	0,873	0,218	1,091	0,016	0,070	0,422
0,009	0,028	0,000	0,012	0,014	0,218	1,091	0,873	0,008	0,035	0,844

Таблица Г.24 – Результаты расчёта погрешностей измерения массовой скорости испарения влаги из листьев тополя (T=393 K)

Массовая скорость испарения · 10 ⁵ , кг/(м ² ·с)			$\bar{W} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	${}^n S \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	v_{k1}	v_{k2}	v_{k3}	${}^n S_{\bar{W}} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$\Delta W \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	δ_W
W_1	W_2	W_3								
70,051	59,770	65,177	64,999	5,143	0,982	1,017	0,035	2,969	12,767	0,196
49,462	52,414	51,779	51,218	1,554	1,130	0,769	0,361	0,897	3,857	0,075
19,126	16,267	12,570	15,988	3,287	0,955	0,085	1,040	1,898	8,160	0,510
1,444	3,200	1,324	1,989	1,050	0,520	1,153	0,633	0,606	2,607	0,311
0,938	1,076	0,478	0,831	0,313	0,343	0,784	1,126	0,181	0,777	0,935
0,782	0,202	0,285	0,423	0,313	1,145	0,704	0,440	0,181	0,778	0,839
0,147	0,120	0,092	0,120	0,028	1,000	0,000	1,000	0,016	0,068	0,573
0,037	0,018	0,018	0,025	0,011	1,155	0,577	0,577	0,006	0,026	0,075

Приложение Д

Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации

Таблица Д.1 – Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации для веток берёзы (Т=333 К)

P^H , Па	$\rho_{с.в.}$, кг/м ³	$m_{с.в(0)}$, кг	$m_{H_2O(0)}$, кг	Δm , кг	m_{H_2O} , кг	M , г/моль	g_{H_2O}	r_{H_2O}	P^* , Па	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$A \cdot 10^6$
19946	1,045	0,43880	0,00434	0,00065	0,00499	27,993	0,059	0,092	1826	6,353	2,763
				0,00088	0,00586	27,816	0,070	0,108	2148	8,568	3,806
				0,00063	0,00649	27,689	0,077	0,119	2377	6,110	2,756
				0,00045	0,00694	27,597	0,083	0,128	2543	4,417	2,014
				0,00046	0,00740	27,505	0,089	0,136	2710	4,456	2,056
				0,00054	0,00794	27,397	0,096	0,146	2907	5,261	2,460
				0,00044	0,00838	27,308	0,101	0,154	3067	4,265	2,016
				0,00037	0,00874	27,234	0,106	0,161	3202	3,605	1,720
				0,00036	0,00911	27,161	0,111	0,167	3334	3,527	1,699
				0,00040	0,00950	27,081	0,116	0,174	3480	3,885	1,890
				0,00032	0,00982	27,017	0,120	0,180	3596	3,097	1,519
				0,00028	0,01010	26,960	0,124	0,185	3699	2,761	1,365
				0,00027	0,01037	26,905	0,127	0,190	3799	2,645	1,317
				0,00028	0,01065	26,849	0,131	0,196	3901	2,727	1,368
				0,00024	0,01089	26,801	0,134	0,200	3988	2,313	1,168
				0,00020	0,01109	26,760	0,137	0,204	4061	1,977	1,003
				0,00018	0,01127	26,724	0,139	0,207	4128	1,755	0,895
				0,00015	0,01142	26,694	0,141	0,210	4181	1,419	0,727
				0,00017	0,01159	26,660	0,144	0,213	4244	1,675	0,862
				0,00014	0,01173	26,632	0,146	0,215	4295	1,356	0,700
				0,00012	0,01185	26,607	0,147	0,218	4339	1,172	0,607
				0,00010	0,01195	26,587	0,149	0,219	4376	0,984	0,511
				0,00010	0,01205	26,567	0,150	0,221	4411	0,954	0,497
				0,00008	0,01212	26,552	0,151	0,223	4439	0,753	0,393
				0,00007	0,01219	26,538	0,152	0,224	4465	0,669	0,350
				0,00007	0,01226	26,524	0,153	0,225	4490	0,669	0,351
				0,00006	0,01232	26,513	0,154	0,226	4510	0,551	0,289
				0,00005	0,01236	26,504	0,154	0,227	4527	0,443	0,233
				0,00004	0,01240	26,495	0,155	0,228	4543	0,427	0,224
				0,00004	0,01245	26,486	0,155	0,229	4559	0,434	0,228
0,00004	0,01249	26,478	0,156	0,229	4574	0,393	0,207				
0,00002	0,01251	26,474	0,156	0,230	4581	0,194	0,102				
0,00006	0,01257	26,462	0,157	0,231	4602	0,572	0,302				
0,00003	0,01260	26,455	0,157	0,231	4614	0,334	0,177				
0,00002	0,01262	26,451	0,158	0,232	4621	0,200	0,106				

Таблица Д.2 – Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации для веток берёзы (Т=353 К)

P^H , Па	$\rho_{с.в}$, кг/м ³	$m_{с.в(0)}$, кг	$m_{H_2O(0)}$, кг	Δm , кг	m_{H_2O} , кг	M , г/моль	g_{H_2O}	r_{H_2O}	P^* , Па	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$A \cdot 10^6$
47415	0,986	0,41393	0,00409	0,00111	0,00520	28,531	0,027	0,043	2020	11,070	1,960
				0,00140	0,00660	28,405	0,034	0,054	2563	13,926	2,501
				0,00097	0,00758	28,318	0,039	0,062	2941	9,681	1,756
				0,00106	0,00864	28,222	0,045	0,071	3354	10,569	1,938
				0,00086	0,00950	28,145	0,050	0,078	3686	8,540	1,580
				0,00058	0,01007	28,093	0,053	0,082	3911	5,749	1,070
				0,00064	0,01071	28,035	0,056	0,088	4157	6,336	1,188
				0,00040	0,01111	27,999	0,058	0,091	4315	4,045	0,761
				0,00024	0,01135	27,978	0,060	0,093	4406	2,358	0,445
				0,00024	0,01159	27,956	0,061	0,095	4500	2,426	0,459
				0,00013	0,01172	27,945	0,062	0,096	4548	1,264	0,239
				0,00007	0,01179	27,938	0,062	0,097	4577	0,742	0,141
				0,00009	0,01188	27,930	0,063	0,097	4612	0,914	0,173
				0,00004	0,01192	27,926	0,063	0,098	4629	0,458	0,087
				0,00002	0,01195	27,924	0,063	0,098	4639	0,252	0,048
				0,00002	0,01197	27,922	0,063	0,098	4648	0,244	0,046
0,00002	0,01199	27,920	0,063	0,098	4657	0,220	0,042				
0,00001	0,01200	27,919	0,063	0,098	4660	0,102	0,019				

Таблица Д.3 – Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации для веток берёзы (Т=373 К)

P^H , Па	$\rho_{с.в}$, кг/м ³	$m_{с.в(0)}$, кг	$m_{H_2O(0)}$, кг	Δm , кг	m_{H_2O} , кг	M , г/моль	g_{H_2O}	r_{H_2O}	P^* , Па	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$A \cdot 10^6$
101418	0,933	0,39174	0,00387	0,00185	0,00572	28,746	0,014	0,023	2345	18,539	1,540
				0,00238	0,00810	28,640	0,021	0,033	3321	23,913	2,010
				0,00191	0,01000	28,555	0,025	0,040	4102	19,203	1,630
				0,00136	0,01136	28,494	0,029	0,046	4661	13,704	1,171
				0,00050	0,01186	28,472	0,030	0,048	4865	4,965	0,425
				0,00023	0,01209	28,462	0,031	0,049	4960	2,291	0,196
				0,00004	0,01213	28,460	0,031	0,049	4977	0,403	0,035
				0,00002	0,01215	28,459	0,031	0,049	4986	0,227	0,019
				0,00001	0,01217	28,459	0,031	0,049	4990	0,110	0,009
				0,00001	0,01217	28,458	0,031	0,049	4993	0,062	0,005
				0,00001	0,01218	28,458	0,031	0,049	4996	0,073	0,006
				0,00001	0,01219	28,458	0,031	0,049	4999	0,058	0,005

Таблица Д.4 – Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации для веток берёзы (T=393 K)

P^H , Па	$\rho_{с.в}$, кг/м ³	$m_{с.в(0)}$, кг	$m_{H_2O(0)}$, кг	Δm , кг	m_{H_2O} , кг	M , г/моль	g_{H_2O}	r_{H_2O}	P^* , Па	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$A \cdot 10^6$
198665	0,885	0,37180	0,00368	0,00344	0,00711	28,830	0,010	0,015	3075	34,915	1,506
				0,00403	0,01114	28,733	0,015	0,024	4815	40,898	1,783
				0,00172	0,01286	28,692	0,018	0,028	5559	17,514	0,767
				0,00016	0,01303	28,688	0,018	0,028	5629	1,648	0,072
				0,00004	0,01307	28,687	0,018	0,028	5647	0,421	0,018
				0,00004	0,01311	28,686	0,018	0,029	5664	0,396	0,017
				0,00002	0,01312	28,686	0,018	0,029	5672	0,189	0,008
				0,00003	0,01315	28,685	0,018	0,029	5683	0,261	0,011
				0,00002	0,01317	28,685	0,018	0,029	5690	0,165	0,007
				0,00001	0,01318	28,685	0,018	0,029	5697	0,142	0,006
0,00001	0,01319	28,684	0,018	0,029	5700	0,080	0,003				

Таблица Д.5 – Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации для веток липы (T=333 K)

P^H , Па	$\rho_{с.в}$, кг/м ³	$m_{с.в(0)}$, кг	$m_{H_2O(0)}$, кг	Δm , кг	m_{H_2O} , кг	M , г/моль	g_{H_2O}	r_{H_2O}	P^* , Па	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$A \cdot 10^6$
19946	1,045	0,43880	0,00434	0,00074	0,00508	27,974	0,060	0,093	1860	7,595	3,311
				0,00091	0,00599	27,790	0,071	0,110	2195	9,364	4,172
				0,00064	0,00663	27,660	0,079	0,122	2430	6,564	2,971
				0,00063	0,00726	27,534	0,087	0,133	2659	6,413	2,948
				0,00069	0,00795	27,394	0,096	0,146	2912	7,092	3,317
				0,00052	0,00847	27,289	0,103	0,156	3102	5,313	2,518
				0,00054	0,00901	27,181	0,110	0,165	3298	5,487	2,636
				0,00057	0,00958	27,066	0,117	0,176	3507	5,851	2,853
				0,00045	0,01002	26,975	0,123	0,184	3671	4,581	2,260
				0,00041	0,01043	26,894	0,128	0,191	3819	4,145	2,066
				0,00047	0,01090	26,799	0,134	0,200	3992	4,824	2,435
				0,00037	0,01127	26,724	0,139	0,207	4127	3,777	1,926
				0,00027	0,01154	26,670	0,143	0,212	4226	2,755	1,415
				0,00033	0,01187	26,602	0,148	0,218	4348	3,422	1,774
				0,00028	0,01215	26,546	0,151	0,223	4451	2,861	1,494
				0,00016	0,01232	26,512	0,154	0,226	4511	1,681	0,882
				0,00020	0,01251	26,472	0,156	0,230	4583	2,012	1,061
				0,00018	0,01269	26,436	0,159	0,233	4649	1,835	0,973
				0,00012	0,01281	26,413	0,160	0,235	4692	1,194	0,635
				0,00007	0,01288	26,398	0,161	0,237	4718	0,738	0,393
0,00009	0,01297	26,380	0,163	0,238	4751	0,935	0,499				
0,00006	0,01304	26,367	0,163	0,239	4775	0,668	0,357				
0,00004	0,01308	26,358	0,164	0,240	4791	0,438	0,235				
0,00003	0,01311	26,352	0,164	0,241	4801	0,295	0,158				
0,00003	0,01314	26,345	0,165	0,241	4814	0,358	0,192				

Таблица Д.6 – Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации для веток липы (Т=353 К)

P^H , Па	$\rho_{с.в}$, кг/м ³	$m_{с.в(0)}$, кг	$m_{H_2O(0)}$, кг	Δm , кг	m_{H_2O} , кг	M , г/моль	g_{H_2O}	r_{H_2O}	P^* , Па	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$A \cdot 10^6$
47415	0,986	0,41393	0,00409	0,00176	0,00586	28,473	0,030	0,048	2273	16,068	2,864
				0,00220	0,00806	28,274	0,042	0,066	3128	20,057	3,656
				0,00157	0,00963	28,133	0,050	0,079	3739	14,317	2,653
				0,00172	0,01135	27,978	0,060	0,093	4406	15,630	2,950
				0,00121	0,01256	27,869	0,066	0,103	4875	11,002	2,103
				0,00097	0,01352	27,782	0,072	0,111	5249	8,737	1,688
				0,00073	0,01425	27,716	0,076	0,117	5534	6,659	1,296
				0,00029	0,01455	27,690	0,077	0,119	5648	2,672	0,522
				0,00024	0,01479	27,668	0,079	0,121	5742	2,201	0,431
				0,00011	0,01491	27,658	0,079	0,122	5787	1,046	0,205
				0,00004	0,01494	27,654	0,080	0,122	5801	0,328	0,064
				0,00006	0,01500	27,649	0,080	0,123	5823	0,523	0,103
				0,00002	0,01502	27,647	0,080	0,123	5830	0,172	0,034
0,00001	0,01503	27,646	0,080	0,123	5835	0,111	0,022				
0,00001	0,01504	27,645	0,080	0,123	5840	0,129	0,025				

Таблица Д.7 – Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации для веток липы (Т=373 К)

P^H , Па	$\rho_{с.в}$, кг/м ³	$m_{с.в(0)}$, кг	$m_{H_2O(0)}$, кг	Δm , кг	m_{H_2O} , кг	M , г/моль	g_{H_2O}	r_{H_2O}	P^* , Па	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$A \cdot 10^6$
101418	0,933	0,39174	0,00387	0,00263	0,00651	28,711	0,016	0,026	2669	28,570	2,383
				0,00299	0,00950	28,577	0,024	0,038	3896	32,410	2,743
				0,00171	0,01121	28,501	0,029	0,045	4599	18,579	1,586
				0,00074	0,01195	28,468	0,031	0,048	4903	7,999	0,685
				0,00007	0,01203	28,465	0,031	0,049	4934	0,801	0,069
				0,00003	0,01206	28,463	0,031	0,049	4947	0,344	0,029
				0,00001	0,01207	28,463	0,031	0,049	4951	0,108	0,009
				0,00001	0,01208	28,463	0,031	0,049	4955	0,108	0,009
				0,00001	0,01209	28,462	0,031	0,049	4960	0,128	0,011
				0,000004	0,01209	28,462	0,031	0,049	4961	0,037	0,003
				0,00001	0,01210	28,462	0,031	0,049	4965	0,087	0,007

Таблица Д.8 – Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации для веток липы (Т=393 К)

P^H , Па	$\rho_{с.в}$, кг/м ³	$m_{с.в(0)}$, кг	$m_{H_2O(0)}$, кг	Δm , кг	m_{H_2O} , кг	M , г/моль	g_{H_2O}	r_{H_2O}	P^* , Па	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$A \cdot 10^6$
198665	0,885	0,37180	0,00368	0,00371	0,00739	28,823	0,010	0,016	3193	34,509	1,490
				0,00408	0,01147	28,726	0,016	0,025	4957	37,785	1,649
				0,00207	0,01354	28,676	0,018	0,029	5852	19,202	0,842
				0,00025	0,01379	28,670	0,019	0,030	5960	2,315	0,102
				0,00005	0,01384	28,669	0,019	0,030	5982	0,487	0,021
				0,00004	0,01388	28,668	0,019	0,030	5999	0,365	0,016
				0,00002	0,01390	28,667	0,019	0,030	6009	0,215	0,009
				0,00002	0,01393	28,667	0,019	0,030	6020	0,232	0,010
				0,00002	0,01395	28,666	0,019	0,030	6028	0,167	0,007
				0,00002	0,01396	28,666	0,019	0,030	6035	0,163	0,007
				0,00001	0,01398	28,665	0,019	0,030	6041	0,136	0,006
0,00002	0,01400	28,665	0,019	0,030	6052	0,233	0,010				

Таблица Д.9 – Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации для веток тополя (Т=333 К)

P^H , Па	$\rho_{с.в}$, кг/м ³	$m_{с.в(0)}$, кг	$m_{H_2O(0)}$, кг	Δm , кг	m_{H_2O} , кг	M , г/моль	g_{H_2O}	r_{H_2O}	P^* , Па	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$A \cdot 10^6$
19946	1,045	0,43880	0,00434	0,00126	0,00559	27,870	0,066	0,103	2049	10,740	4,740
				0,00151	0,00710	27,565	0,085	0,130	2602	13,044	5,973
				0,00081	0,00792	27,401	0,095	0,145	2900	7,023	3,282
				0,00059	0,00850	27,283	0,103	0,156	3114	5,106	2,421
				0,00062	0,00912	27,158	0,111	0,167	3341	5,374	2,590
				0,00062	0,00975	27,032	0,119	0,179	3569	5,415	2,652
				0,00046	0,01020	26,939	0,125	0,187	3736	4,002	1,983
				0,00046	0,01066	26,847	0,131	0,196	3904	4,006	2,010
				0,00051	0,01117	26,744	0,138	0,205	4090	4,404	2,239
				0,00041	0,01157	26,662	0,143	0,213	4239	3,544	1,822
				0,00029	0,01187	26,603	0,147	0,218	4347	2,607	1,351
				0,00038	0,01224	26,527	0,153	0,225	4484	3,257	1,705
				0,00037	0,01261	26,452	0,158	0,232	4620	3,221	1,704
				0,00023	0,01285	26,406	0,161	0,236	4704	2,051	1,092
				0,00025	0,01310	26,355	0,164	0,240	4796	2,202	1,180
				0,00028	0,01338	26,298	0,168	0,246	4900	2,260	1,330
				0,00027	0,01365	26,243	0,172	0,251	4999	2,336	1,272
				0,00021	0,01386	26,201	0,175	0,254	5076	1,843	1,010
				0,00020	0,01406	26,160	0,178	0,258	5150	1,770	0,975
				0,00020	0,01427	26,119	0,181	0,262	5225	1,770	0,981
				0,00017	0,01444	26,084	0,183	0,265	5287	1,481	0,825
				0,00013	0,01457	26,058	0,185	0,267	5334	1,133	0,633
				0,00014	0,01470	26,030	0,187	0,270	5385	1,200	0,673
				0,00011	0,01481	26,008	0,188	0,272	5425	0,959	0,540
				0,00009	0,01490	25,991	0,189	0,274	5457	0,757	0,427
				0,00008	0,01498	25,974	0,191	0,275	5487	0,724	0,410
				0,00007	0,01506	25,959	0,192	0,276	5514	0,645	0,366
				0,00006	0,01512	25,947	0,193	0,278	5536	0,525	0,298
				0,00005	0,01516	25,938	0,193	0,278	5553	0,405	0,230
				0,00005	0,01521	25,928	0,194	0,279	5570	0,413	0,235
				0,00004	0,01525	25,920	0,194	0,280	5585	0,344	0,196
				0,00003	0,01528	25,914	0,195	0,281	5596	0,276	0,157
				0,00003	0,01531	25,908	0,195	0,281	5606	0,244	0,140
				0,00002	0,01533	25,904	0,196	0,281	5614	0,186	0,106
0,00002	0,01535	25,899	0,196	0,282	5622	0,194	0,111				
0,00002	0,01537	25,896	0,196	0,282	5629	0,158	0,090				
0,00002	0,01539	25,892	0,196	0,283	5636	0,170	0,097				
0,00002	0,01541	25,889	0,197	0,283	5642	0,139	0,080				
0,00001	0,01542	25,887	0,197	0,283	5645	0,083	0,048				
0,00001	0,01543	25,884	0,197	0,283	5649	0,089	0,051				
0,000001	0,01543	25,884	0,197	0,283	5650	0,008	0,005				
0,000002	0,01543	25,884	0,197	0,283	5650	0,016	0,009				

Таблица Д.10 – Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации для веток тополя (Т=353 К)

P^H , Па	$\rho_{с.в}$, кг/м ³	$m_{с.в(0)}$, кг	$m_{H_2O(0)}$, кг	Δm , кг	m_{H_2O} , кг	M , г/моль	g_{H_2O}	r_{H_2O}	P^* , Па	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$A \cdot 10^6$
47415	0,986	0,41393	0,00409	0,00162	0,00571	28,486	0,030	0,047	2216	14,474	2,576
				0,00180	0,00751	28,323	0,039	0,062	2917	16,144	2,927
				0,00140	0,00891	28,198	0,047	0,073	3459	12,462	2,292
				0,00151	0,01042	28,061	0,055	0,085	4045	13,459	2,515
				0,00117	0,01160	27,956	0,061	0,095	4501	10,433	1,974
				0,00095	0,01255	27,870	0,066	0,103	4872	8,460	1,617
				0,00097	0,01352	27,783	0,072	0,111	5247	8,549	1,651
				0,00064	0,01416	27,725	0,075	0,116	5497	5,656	1,100
				0,00056	0,01472	27,675	0,078	0,120	5713	4,859	0,951
				0,00051	0,01523	27,629	0,081	0,125	5911	4,427	0,871
				0,00029	0,01552	27,602	0,083	0,127	6025	2,524	0,498
				0,00027	0,01578	27,578	0,084	0,129	6128	2,285	0,452
				0,00021	0,01599	27,560	0,086	0,131	6208	1,773	0,352
				0,00006	0,01605	27,554	0,086	0,131	6231	0,511	0,102
				0,00010	0,01615	27,546	0,086	0,132	6269	0,844	0,168
				0,00004	0,01619	27,541	0,087	0,133	6287	0,387	0,077
				0,00001	0,01620	27,541	0,087	0,133	6290	0,079	0,016
0,00004	0,01624	27,537	0,087	0,133	6305	0,311	0,062				
0,00002	0,01626	27,536	0,087	0,133	6312	0,154	0,031				
0,00001	0,01627	27,535	0,087	0,133	6315	0,072	0,014				

Таблица Д.11 – Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации для веток тополя (Т=373 К)

P^H , Па	$\rho_{с.в}$, кг/м ³	$m_{с.в(0)}$, кг	$m_{H_2O(0)}$, кг	Δm , кг	m_{H_2O} , кг	M , г/моль	g_{H_2O}	r_{H_2O}	P^* , Па	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$A \cdot 10^6$
101418	0,933	0,39174	0,00387	0,00258	0,00645	28,713	0,016	0,026	2648	21,847	1,822
				0,00293	0,00939	28,582	0,024	0,038	3851	24,851	2,103
				0,00227	0,01166	28,481	0,030	0,047	4782	19,224	1,645
				0,00204	0,01370	28,390	0,035	0,055	5620	17,285	1,494
				0,00119	0,01489	28,338	0,038	0,060	6107	10,035	0,873
				0,00090	0,01578	28,298	0,041	0,064	6474	7,559	0,660
				0,00044	0,01622	28,278	0,042	0,066	6654	3,717	0,325
				0,00020	0,01642	28,270	0,042	0,066	6735	1,665	0,146
				0,00008	0,01649	28,266	0,042	0,067	6766	0,640	0,056
				0,00003	0,01652	28,265	0,043	0,067	6777	0,216	0,019
				0,00003	0,01655	28,264	0,043	0,067	6788	0,226	0,020
				0,00002	0,01657	28,263	0,043	0,067	6795	0,159	0,014
				0,00001	0,01658	28,262	0,043	0,067	6800	0,101	0,009
				0,00002	0,01660	28,262	0,043	0,067	6808	0,156	0,014
0,00001	0,01661	28,261	0,043	0,067	6813	0,102	0,009				
0,00001	0,01662	28,261	0,043	0,067	6818	0,104	0,009				
0,00001	0,01663	28,260	0,043	0,067	6823	0,098	0,009				

Таблица Д.12 – Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации для веток тополя (Т=393 К)

P^H , Па	$\rho_{с.в}$, кг/м ³	$m_{с.в(0)}$, кг	$m_{H_2O(0)}$, кг	Δm , кг	m_{H_2O} , кг	M , г/моль	g_{H_2O}	r_{H_2O}	P^* , Па	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$A \cdot 10^6$
198665	0,885	0,37180	0,00368	1,825	0,00736	28,824	0,010	0,016	3448	33,656	1,453
				2,112	0,01082	28,741	0,015	0,024	5192	31,392	1,367
				1,656	0,01400	28,665	0,019	0,030	6795	29,169	1,281
				1,507	0,01598	28,618	0,022	0,035	7791	18,234	0,805
				0,881	0,01647	28,606	0,023	0,036	8040	4,542	0,201
				0,667	0,01658	28,603	0,023	0,036	8095	1,004	0,044
				0,329	0,01664	28,602	0,023	0,036	8124	0,520	0,023
				0,148	0,01668	28,601	0,023	0,036	8148	0,443	0,020
				0,057	0,01672	28,600	0,023	0,036	8164	0,283	0,013
				0,019	0,01675	28,599	0,023	0,036	8180	0,296	0,013
				0,020	0,01676	28,599	0,023	0,036	8187	0,123	0,005
				0,014	0,01679	28,598	0,023	0,037	8200	0,230	0,010
				0,009	0,01680	28,598	0,023	0,037	8207	0,123	0,005
				0,014	0,01681	28,598	0,023	0,037	8213	0,118	0,005
0,009	0,01683	28,597	0,023	0,037	8220	0,111	0,005				

Таблица Д.13 – Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации для листьев берёзы (Т=333 К)

P^H , Па	$\rho_{с.в.}$, кг/м ³	$m_{с.в(0)}$, кг	$m_{H_2O(0)}$, кг	Δm , кг	m_{H_2O} , кг	M , г/моль	g_{H_2O}	r_{H_2O}	P^* , Па	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$A \cdot 10^6$
19946	1,045	0,37611	0,00372	0,00098	0,00470	27,892	0,065	0,101	2008	9,042	3,980
				0,00093	0,00563	27,672	0,079	0,121	2407	8,582	3,879
				0,00085	0,00648	27,472	0,091	0,139	2770	7,816	3,620
				0,00077	0,00725	27,292	0,102	0,155	3098	7,050	3,340
				0,00075	0,00800	27,115	0,114	0,171	3418	6,897	3,341
				0,00075	0,00875	26,938	0,125	0,187	3739	6,897	3,419
				0,00070	0,00945	26,773	0,136	0,202	4038	6,437	3,261
				0,00068	0,01013	26,612	0,147	0,217	4330	6,284	3,252
				0,00065	0,01078	26,459	0,157	0,231	4608	5,977	3,159
				0,00058	0,01137	26,322	0,167	0,243	4857	5,364	2,889
				0,00058	0,01195	26,184	0,176	0,256	5106	5,364	2,945
				0,00057	0,01252	26,051	0,185	0,268	5348	5,211	2,916
				0,00053	0,01305	25,925	0,194	0,280	5576	4,904	2,795
				0,00052	0,01357	25,803	0,203	0,291	5797	4,751	2,756
				0,00047	0,01403	25,693	0,211	0,301	5996	4,291	2,530
				0,00047	0,01450	25,583	0,219	0,311	6195	4,291	2,573
				0,00043	0,01493	25,481	0,226	0,320	6381	3,985	2,426
				0,00043	0,01537	25,379	0,233	0,329	6566	3,985	2,465
				0,00037	0,01573	25,293	0,240	0,337	6722	3,372	2,114
				0,00035	0,01608	25,210	0,246	0,345	6872	3,218	2,044
				0,00033	0,01642	25,132	0,252	0,352	7014	3,065	1,971
				0,00033	0,01675	25,053	0,258	0,359	7157	3,065	1,997
				0,00028	0,01703	24,986	0,263	0,365	7278	2,605	1,716
				0,00028	0,01732	24,920	0,268	0,371	7399	2,605	1,734
				0,00025	0,01757	24,861	0,272	0,376	7506	2,299	1,545
				0,00022	0,01778	24,810	0,276	0,381	7598	1,992	1,351
				0,00020	0,01798	24,763	0,280	0,385	7684	1,839	1,257
				0,00017	0,01815	24,723	0,283	0,389	7755	1,533	1,054
				0,00017	0,01832	24,684	0,286	0,392	7826	1,533	1,061
				0,00012	0,01843	24,656	0,288	0,395	7876	1,073	0,746
0,00012	0,01855	24,629	0,290	0,397	7926	1,073	0,750				
0,00007	0,01862	24,613	0,292	0,399	7954	0,613	0,430				
0,00007	0,01868	24,598	0,293	0,400	7983	0,613	0,431				
0,00005	0,01873	24,586	0,294	0,401	8004	0,460	0,324				
0,00003	0,01877	24,578	0,294	0,402	8018	0,307	0,216				

Таблица Д.14 – Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации для листьев берёзы (Т=353 К)

P^H , Па	$\rho_{с.в}$, кг/м ³	$m_{с.в(0)}$, кг	$m_{H_2O(0)}$, кг	Δm , кг	m_{H_2O} , кг	M , г/моль	g_{H_2O}	r_{H_2O}	P^* , Па	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$A \cdot 10^6$
47415	0,986	0,35480	0,00351	0,00147	0,00497	28,477	0,030	0,048	2253	13,487	2,402
				0,00145	0,00642	28,325	0,039	0,061	2909	13,333	2,417
				0,00130	0,00772	28,188	0,047	0,074	3498	11,954	2,201
				0,00123	0,00896	28,059	0,055	0,086	4057	11,341	2,120
				0,00110	0,01006	27,943	0,062	0,096	4555	10,115	1,917
				0,00103	0,01109	27,835	0,069	0,106	5023	9,502	1,824
				0,00095	0,01204	27,735	0,075	0,115	5453	8,736	1,697
				0,00087	0,01291	27,644	0,080	0,123	5846	7,969	1,565
				0,00078	0,01369	27,562	0,085	0,131	6200	7,203	1,429
				0,00073	0,01442	27,484	0,090	0,138	6533	6,743	1,351
				0,00075	0,01517	27,406	0,095	0,145	6872	6,897	1,395
				0,00057	0,01574	27,346	0,099	0,150	7129	5,211	1,062
				0,00053	0,01627	27,290	0,103	0,155	7370	4,904	1,006
				0,00042	0,01669	27,246	0,105	0,159	7559	3,831	0,791
				0,00037	0,01706	27,208	0,108	0,163	7725	3,372	0,699
				0,00028	0,01734	27,178	0,110	0,166	7854	2,605	0,542
				0,00020	0,01754	27,157	0,111	0,168	7944	1,839	0,384
				0,00015	0,01769	27,141	0,112	0,169	8012	1,379	0,288
0,00007	0,01776	27,134	0,113	0,170	8042	0,613	0,128				
0,00007	0,01782	27,127	0,113	0,170	8072	0,613	0,128				
0,00007	0,01789	27,120	0,113	0,171	8103	0,613	0,129				

Таблица Д.15 – Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации для листьев берёзы (Т=373 К)

P^H , Па	$\rho_{с.в}$, кг/м ³	$m_{с.в(0)}$, кг	$m_{H_2O(0)}$, кг	Δm , кг	m_{H_2O} , кг	M , г/моль	g_{H_2O}	r_{H_2O}	P^* , Па	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$A \cdot 10^6$
101418	0,933	0,33578	0,00332	0,00240	0,00572	28,703	0,017	0,027	2737	22,069	1,842
				0,00243	0,00815	28,577	0,024	0,038	3901	22,375	1,894
				0,00203	0,01019	28,471	0,030	0,048	4875	18,697	1,602
				0,00173	0,01192	28,381	0,036	0,056	5704	15,939	1,379
				0,00138	0,01330	28,310	0,040	0,063	6366	12,720	1,110
				0,00128	0,01459	28,243	0,044	0,069	6980	11,801	1,038
				0,00100	0,01559	28,191	0,047	0,074	7459	9,195	0,813
				0,00078	0,01637	28,150	0,049	0,077	7834	7,203	0,640
				0,00057	0,01694	28,121	0,051	0,080	8105	5,211	0,465
				0,00038	0,01732	28,101	0,052	0,082	8288	3,525	0,315
				0,00023	0,01755	28,089	0,053	0,083	8400	2,146	0,192
				0,00008	0,01764	28,085	0,053	0,083	8440	0,766	0,069
				0,00005	0,01769	28,082	0,053	0,083	8464	0,460	0,041

Таблица Д.16 – Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации для листьев берёзы (T=393 K)

P^H , Па	$\rho_{с.в.}$, кг/м ³	$m_{с.в(0)}$, кг	$m_{H_2O(0)}$, кг	Δm , кг	m_{H_2O} , кг	M , г/моль	g_{H_2O}	r_{H_2O}	P^* , Па	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$A \cdot 10^6$
198665	0,885	0,31869	0,00315	0,00303	0,00618	28,827	0,010	0,016	3118	27,893	1,203
				0,00333	0,00952	28,734	0,015	0,024	4799	30,651	1,336
				0,00277	0,01228	28,657	0,020	0,031	6194	25,441	1,118
				0,00227	0,01455	28,594	0,023	0,037	7337	20,843	0,923
				0,00177	0,01632	28,544	0,026	0,041	8227	16,245	0,723
				0,00125	0,01757	28,510	0,028	0,045	8858	11,494	0,514
				0,00075	0,01832	28,489	0,029	0,046	9236	6,897	0,309
				0,00040	0,01872	28,477	0,030	0,048	9438	3,678	0,165
				0,00018	0,01890	28,472	0,030	0,048	9530	1,686	0,076
				0,00007	0,01897	28,470	0,030	0,048	9564	0,613	0,028
				0,00005	0,01902	28,469	0,031	0,048	9589	0,460	0,021
				0,00003	0,01905	28,468	0,031	0,048	9606	0,307	0,014
0,00003	0,01908	28,467	0,031	0,048	9622	0,307	0,014				

Таблица Д.17 – Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации для листьев липы (T=333 K)

P^H , Па	$\rho_{с.в.}$, кг/м ³	$m_{с.в(0)}$, кг	$m_{H_2O(0)}$, кг	Δm , кг	m_{H_2O} , кг	M , г/моль	g_{H_2O}	r_{H_2O}	P^* , Па	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$A \cdot 10^6$
19946	1,045	0,43880	0,00434	0,00163	0,00596	27,796	0,071	0,109	2184	14,958	6,660
				0,00164	0,00760	27,464	0,092	0,140	2785	15,090	6,996
				0,00126	0,00887	27,209	0,108	0,163	3248	11,629	5,567
				0,00126	0,01013	26,954	0,124	0,186	3710	11,586	5,731
				0,00141	0,01154	26,670	0,143	0,212	4225	12,950	6,651
				0,00116	0,01270	26,435	0,159	0,233	4650	10,676	5,660
				0,00101	0,01371	26,231	0,173	0,252	5022	9,321	5,085
				0,00089	0,01460	26,052	0,185	0,268	5346	8,138	4,553
				0,00083	0,01543	25,884	0,197	0,283	5650	7,629	4,374
				0,00064	0,01607	25,755	0,206	0,295	5884	5,888	3,440
				0,00064	0,01671	25,626	0,215	0,307	6118	5,882	3,504
				0,00068	0,01739	25,488	0,225	0,319	6369	6,287	3,824
				0,00053	0,01792	25,380	0,233	0,329	6564	4,895	3,027
				0,00039	0,01831	25,301	0,239	0,336	6707	3,595	2,251
				0,00037	0,01868	25,227	0,245	0,343	6841	3,378	2,140
				0,00026	0,01894	25,174	0,249	0,348	6938	2,421	1,547
				0,00012	0,01907	25,149	0,251	0,350	6983	1,140	0,731
				0,00007	0,01914	25,135	0,252	0,351	7009	0,638	0,410
				0,00003	0,01917	25,128	0,252	0,352	7021	0,319	0,205
				0,00001	0,01919	25,125	0,252	0,352	7026	0,116	0,075
0,00001	0,01919	25,124	0,252	0,352	7029	0,074	0,047				
0,000004	0,01920	25,123	0,253	0,352	7030	0,034	0,022				
0,000002	0,01920	25,122	0,253	0,353	7031	0,023	0,015				

Таблица Д.18 – Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации для листьев липы (T=353 К)

P^H , Па	$\rho_{с.в.}$, кг/м ³	$m_{с.в(0)}$, кг	$m_{H_2O(0)}$, кг	Δm , кг	m_{H_2O} , кг	M , г/моль	g_{H_2O}	r_{H_2O}	P^* , Па	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$A \cdot 10^6$
47415	0,986	0,41393	0,00409	0,00280	0,00689	28,379	0,036	0,056	2677	25,778	4,643
				0,00291	0,00981	28,117	0,051	0,080	3807	26,780	4,972
				0,00266	0,01246	27,878	0,066	0,102	4838	24,426	4,665
				0,00217	0,01464	27,682	0,078	0,120	5682	19,985	3,907
				0,00166	0,01629	27,533	0,087	0,133	6325	15,237	3,034
				0,00123	0,01753	27,422	0,094	0,143	6804	11,338	2,289
				0,00082	0,01834	27,348	0,099	0,150	7121	7,513	1,531
				0,00045	0,01879	27,308	0,101	0,154	7295	4,123	0,844
				0,00017	0,01896	27,292	0,102	0,155	7361	1,551	0,318
				0,00005	0,01901	27,288	0,103	0,156	7379	0,435	0,089
				0,00002	0,01903	27,287	0,103	0,156	7386	0,156	0,032
				0,00001	0,01903	27,286	0,103	0,156	7388	0,055	0,011
0,000003	0,01903	27,286	0,103	0,156	7389	0,031	0,006				

Таблица Д.19 – Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации для листьев липы (T=373 К)

P^H , Па	$\rho_{с.в.}$, кг/м ³	$m_{с.в(0)}$, кг	$m_{H_2O(0)}$, кг	Δm , кг	m_{H_2O} , кг	M , г/моль	g_{H_2O}	r_{H_2O}	P^* , Па	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$A \cdot 10^6$
101418	0,933	0,39174	0,00387	0,00485	0,00872	28,612	0,022	0,035	3577	44,570	3,758
				0,00462	0,01334	28,407	0,034	0,054	5472	42,483	3,666
				0,00290	0,01624	28,278	0,042	0,066	6661	26,651	2,334
				0,00192	0,01816	28,192	0,047	0,073	7448	17,646	1,561
				0,00053	0,01869	28,169	0,048	0,076	7665	4,864	0,431
				0,00012	0,01880	28,164	0,049	0,076	7712	1,061	0,094
				0,00004	0,01884	28,162	0,049	0,076	7730	0,398	0,035
				0,00002	0,01886	28,161	0,049	0,076	7736	0,147	0,013
				0,00001	0,01887	28,161	0,049	0,076	7740	0,077	0,007
				0,00001	0,01887	28,160	0,049	0,076	7742	0,046	0,004
				0,000002	0,01888	28,160	0,049	0,076	7743	0,018	0,002

Таблица Д.20 – Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации для листьев липы (T=393 К)

P^H , Па	$\rho_{с.в.}$, кг/м ³	$m_{с.в(0)}$, кг	$m_{H_2O(0)}$, кг	Δm , кг	m_{H_2O} , кг	M , г/моль	g_{H_2O}	r_{H_2O}	P^* , Па	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$A \cdot 10^6$
198665	0,885	0,37180	0,00368	0,00716	0,01083	28,741	0,015	0,024	4681	65,793	2,866
				0,00529	0,01612	28,614	0,022	0,035	6969	48,684	2,151
				0,00218	0,01831	28,562	0,025	0,040	7913	20,086	0,893
				0,00021	0,01851	28,557	0,025	0,040	8002	1,885	0,084
				0,00005	0,01857	28,556	0,025	0,040	8024	0,475	0,021
				0,00002	0,01858	28,555	0,025	0,040	8032	0,169	0,007
				0,00004	0,01863	28,554	0,026	0,041	8051	0,408	0,018
				0,000002	0,01863	28,554	0,026	0,041	8052	0,023	0,001

Таблица Д.21 – Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации для листьев тополя (Т=333 К)

P^H , Па	$\rho_{с.в}$, кг/м ³	$m_{с.в(0)}$, кг	$m_{H_2O(0)}$, кг	Δm , кг	m_{H_2O} , кг	M , г/моль	g_{H_2O}	r_{H_2O}	P^* , Па	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$A \cdot 10^6$
19946	1,045	0,43880	0,00434	0,00137	0,00570	27,848	0,068	0,105	2089	12,576	5,565
				0,00171	0,00742	27,502	0,089	0,136	2716	15,746	7,266
				0,00135	0,00877	27,229	0,106	0,161	3212	12,435	5,938
				0,00134	0,01011	26,959	0,124	0,186	3701	12,297	6,079
				0,00118	0,01129	26,720	0,140	0,207	4133	10,851	5,535
				0,00098	0,01227	26,522	0,153	0,225	4493	9,024	4,728
				0,00097	0,01324	26,326	0,166	0,243	4849	8,938	4,811
				0,00094	0,01418	26,135	0,179	0,260	5195	8,687	4,803
				0,00078	0,01496	25,979	0,190	0,275	5479	7,133	4,033
				0,00072	0,01568	25,834	0,201	0,288	5741	6,593	3,808
				0,00072	0,01640	25,689	0,211	0,301	6004	6,602	3,896
				0,00047	0,01686	25,594	0,218	0,310	6176	4,316	2,583
				0,00039	0,01726	25,514	0,224	0,317	6320	3,620	2,193
				0,00047	0,01773	25,419	0,231	0,326	6494	4,356	2,678
				0,00023	0,01796	25,373	0,234	0,330	6577	2,087	1,292
				0,00011	0,01807	25,351	0,236	0,332	6616	0,990	0,615
				0,00006	0,01813	25,338	0,236	0,333	6640	0,585	0,364
0,00005	0,01818	25,327	0,237	0,334	6659	0,497	0,310				
0,00001	0,01819	25,325	0,237	0,334	6663	0,089	0,055				
0,000003	0,01820	25,325	0,237	0,334	6664	0,028	0,017				

Таблица Д.22– Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации для листьев тополя (Т=353 К)

P^H , Па	$\rho_{с.в}$, кг/м ³	$m_{с.в(0)}$, кг	$m_{H_2O(0)}$, кг	Δm , кг	m_{H_2O} , кг	M , г/моль	g_{H_2O}	r_{H_2O}	P^* , Па	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$A \cdot 10^6$
47415	0,986	0,41393	0,00409	0,00306	0,00715	28,356	0,037	0,059	2777	28,159	5,086
				0,00344	0,01060	28,046	0,056	0,087	4113	31,651	5,925
				0,00258	0,01318	27,813	0,070	0,108	5115	23,727	4,566
				0,00219	0,01537	27,616	0,082	0,126	5965	20,135	3,968
				0,00155	0,01692	27,476	0,091	0,139	6568	14,271	2,861
				0,00103	0,01795	27,383	0,097	0,147	6969	9,496	1,926
				0,00035	0,01830	27,351	0,099	0,150	7106	3,255	0,663
				0,00012	0,01842	27,341	0,099	0,151	7151	1,064	0,217
				0,00003	0,01845	27,338	0,099	0,151	7164	0,316	0,064
				0,00001	0,01846	27,337	0,100	0,151	7168	0,092	0,019
				0,000005	0,01847	27,337	0,100	0,151	7170	0,041	0,008
				0,000002	0,01847	27,336	0,100	0,151	7171	0,018	0,004

Таблица Д.23 – Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации для листьев тополя (Т=373 К)

P^H , Па	$\rho_{с.в}$, кг/м ³	$m_{с.в(0)}$, кг	$m_{H_2O(0)}$, кг	Δm , кг	m_{H_2O} , кг	M , г/моль	g_{H_2O}	r_{H_2O}	P^* , Па	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$A \cdot 10^6$
101418	0,933	0,39174	0,00387	0,00586	0,00973	28,567	0,025	0,039	3990	53,842	4,563
				0,00488	0,01460	28,350	0,038	0,059	5991	44,849	3,895
				0,00308	0,01769	28,213	0,046	0,072	7256	28,365	2,503
				0,00108	0,01877	28,165	0,049	0,076	7700	9,959	0,884
				0,00015	0,01892	28,158	0,049	0,077	7763	1,398	0,124
				0,00005	0,01897	28,156	0,049	0,077	7783	0,444	0,039
				0,00002	0,01900	28,155	0,049	0,077	7792	0,205	0,018
				0,00002	0,01901	28,154	0,049	0,077	7798	0,138	0,012
				0,00001	0,01902	28,154	0,049	0,077	7802	0,101	0,009
				0,00001	0,01903	28,153	0,049	0,077	7805	0,049	0,004
				0,000002	0,01903	28,153	0,049	0,077	7805	0,018	0,002
0,000001	0,01903	28,153	0,049	0,077	7806	0,009	0,001				

Таблица Д.24 – Результаты расчёта парциального давления и коэффициента аккомодации для листьев тополя (Т=393 К)

P^H , Па	$\rho_{с.в}$, кг/м ³	$m_{с.в(0)}$, кг	$m_{H_2O(0)}$, кг	Δm , кг	m_{H_2O} , кг	M , г/моль	g_{H_2O}	r_{H_2O}	P^* , Па	$W_{исп} \cdot 10^5$, кг/(м ² ·с)	$A \cdot 10^6$
198665	0,885	0,37180	0,00368	0,00707	0,01074	28,743	0,015	0,023	4643	65,134	649,992
				0,00557	0,01631	28,610	0,022	0,035	7051	50,881	512,184
				0,00174	0,01805	28,568	0,025	0,039	7802	15,939	159,877
				0,00022	0,01827	28,563	0,025	0,040	7896	1,992	19,893
				0,00009	0,01836	28,561	0,025	0,040	7935	0,460	8,307
				0,00005	0,01841	28,560	0,025	0,040	7955	0,613	4,230
				0,00001	0,01842	28,559	0,025	0,040	7960	0,460	1,195
				0,000003	0,01842	28,559	0,025	0,040	7961	0,000	0,245