

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт Энергетический  
Направление подготовки теплоэнергетика и теплотехника  
направление теплофизика в теплоэнергетике  
Кафедра теоретической и промышленной теплотехники

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Математическое моделирование процесса сушки древесного биотоплива</b>

УДК 630:620.95:66.047:519.876

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ5Г	Дятчина Анна Сергеевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ТПТ	Бульба Е.Е.	К.Т.Н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Попова С.Н.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Василевский М.В.	К.Т.Н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ТПТ	Кузнецов Г.В.	профессор, д.ф.-м.н.		

Томск – 2017 г.

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

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<b>Универсальные компетенции</b>		
P1	Использовать представления о методологических основах научного познания и творчества, анализировать, синтезировать и критически оценивать знания	Требования ФГОС (ОК- 8, 9; ПК-4), Критерий 5 АИОР (п.2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P2	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности	Требования ФГОС (ОК-3; ПК-8, 24), Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P3	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы, состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации, осуществлять педагогическую деятельность в области профессиональной подготовки	Требования ФГОС (ОК-4, 5; ПК-3, 16, 17, 25, 27, 28, 32), Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P4	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной инженерной деятельности, компетентность в вопросах устойчивого развития.	Требования ФГОС (ОК-7), Критерий 5 АИОР (пп.2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P5	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1, 2, 6), Критерий 5 АИОР (п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
<b>Профессиональные компетенции</b>		
P6	Использовать глубокие естественнонаучные, математические и инженерные знания для создания и применения инновационных технологий в теплоэнергетике	Требования ФГОС (ПК-1, 5), Критерии 5 АИОР (п.1.1), согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P7	Применять глубокие знания в области современных технологий теплоэнергетического производства для постановки и решения задач инженерного анализа, связанных с созданием и эксплуатацией теплотехнического и теплотехнологического оборудования и установок, с использованием системного анализа и моделирования объектов и	Требования ФГОС (ПК-2, 7, 11, 18 – 20, 29, 31), Критерий 5 АИОР (пп.1.1, 1.2, 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

	процессов теплоэнергетики	
P8	Разрабатывать и планировать к разработке технологические процессы, проектировать и использовать новое теплотехнологическое оборудование и теплотехнические установки, в том числе с применением компьютерных и информационных технологий	Требования ФГОС (ПК-9, 10, 12 – 15, 30), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	Использовать современные достижения науки и передовой технологии в теоретических и экспериментальных научных исследованиях, интерпретировать и представлять их результаты, давать практические рекомендации по внедрению в производство	Требования ФГОС (ПК-6, 22 – 24, ), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P10	Применять методы и средства автоматизированных систем управления производства, обеспечивать его высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на теплоэнергетическом производстве, выполнять требования по защите окружающей среды	Требования ФГОС (ПК-21, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	Готовность к педагогической деятельности в области профессиональной подготовки	Требования ФГОС (ПК-32), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ**

Направление подготовки **теплоэнергетика и теплотехника**  
направление **теплофизика в теплоэнергетике**

Кафедра **теоретической и промышленной теплотехники**

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой ТПТ

\_\_\_\_\_ Кузнецов Г.В.

(Подпись) (Дата)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группы	ФИО
5БМ5Г	Дятчиной Анне Сергеевне

Тема работы:

**Математическое моделирование процесса сушки древесного биотоплива**

Утверждена приказом ректора (номер, дата)

№235/с от 27.01.2017

Срок сдачи студентом выполненной работы:

30.05.2017 г.

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

**Исходные данные к работе**

*(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); 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.).*

Объектом исследования является древесина хвойных (кедр, сосна, лиственница, пихта) и лиственных (береза, осина, клен, тополь) пород. Предмет исследования – математическое моделирование процесса сушки древесной биомассы.

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <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>	<p>Анализ современных литературных источников по теме диссертации. Формулировка математической моделей процесса сушки древесины. Осуществление численного расчета в системе MATLAB. Анализ результатов. Формулирование выводов по результатам численного исследования.</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p><b>Перечень графического материала</b>  <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	
------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**  
*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Попова Светлана Николаевна
Социальная ответственность	Василевский Михаил Викторович
Раздел ВКР на иностранном языке	Тарасова Екатерина Сергеевна Орлова Евгения Георгиевна

<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>
Введение
Геометрическая постановка задачи, математическая постановка задачи
Результаты численного моделирования процесса сушки
Заключение
Список используемой литературы

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	
--------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

**Задание выдал руководитель:**

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

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ5Г	Дятчина Анна Сергеевна		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 110 страниц, 10 рисунков, 12 таблиц, 55 источников литературы.

Ключевые слова: математическое моделирование, процесс сушки, коэффициент аккомодации, массовая скорость испарения, влажность.

Объектом исследования является – лиственная и хвойная биомасса.

Цель работы – теоретическое исследование влияния теплофизических свойств материалов растительного происхождения на процесс сушки и анализ процесса тепломассопереноса при сушке влажной древесины различного типа.

В процессе исследования сформулирована математическая модель процесса сушки влажной древесины.

В результате исследования получены результаты изменения массовой скорости испарения для лиственных и хвойных пород, а также проведен расчет коэффициента аккомодации. Получены зависимости массовой скорости испарения от времени сушки при различных начальных параметрах и характеристиках древесины и зависимости коэффициента аккомодации от массовой скорости испарения.

Основные технологические характеристики: программная реализация математической модели процесса сушки древесной биомассы выполнена в системе MATLAB.

Область применения: полученные результаты могут быть применены при разработке теоретических основ, которые станут базой для государственных и отраслевых стандартов при проведении НИОКР по разработке сушильных агрегатов древесной биомассы.

Экономическая эффективность/значимость работы: с помощью математического моделирования процессов тепло – и массопереноса при сушке влажной древесины возможно без привлечения экспериментов повысить точность расчета и реализовать потенциал энергосбережения при сохранении качества высушенного изделия.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	9
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ.	12
1.1. Биомасса, виды, достоинства и недостатки.....	12
1.2. Состав и энергетическая ценность, данные о биомассе.....	14
1.3. Биоэнергетика, современное состояние.....	18
1.4. Обзор и оценка потенциала лесов томской области.....	21
1.5. Теоретические сведения о сушильном процессе.....	22
1.6. Математическое моделирование процесса сушки древесины.....	28
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	31
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	40
3.1. Физическая постановка задачи.....	41
3.2. Геометрия области решения.....	45
3.3. Математическая постановка задачи.....	50
3.4. Оценка достоверности результатов численного моделирования.....	54
3.4.1. Расчет нестационарной теплопроводности стержня в одномерном режиме.....	55
3.4.2. Расчет нестационарной теплопроводности пластины в двумерном режиме.....	60
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	66
4.1. Результаты численного решения.....	66
ГЛАВА 5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	74
5.1. Оценка перспективности проведения научного исследования.....	74
5.2. План работ.....	77
5.3. Расчет сметы затрат на исследование.....	78
5.4. Оценка научно–технической результативности научно–исследовательской работы.....	79
ГЛАВА 6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	82
6.1. Профессиональная социальная безопасность.....	83

6.1.1. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при эксплуатации исследуемого объекта .....	86
6.1.2. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.....	87
6.1.3. Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов. ....	88
6.2. Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	90
6.2.1. Анализ вероятных ЧС, которые могут при проведении исследований .....	91
6.2.2. Пожарная безопасность .....	92
6.3. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	94
6.3.1. Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства.....	95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	96
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ .....	102
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	103
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	109

## **ВВЕДЕНИЕ**

Сушка – это процесс удаления влаги из твердого или пастообразного материала путем испарения содержащейся в нем жидкости за счет подведенного к материалу тепла [1]. Целью сушки является улучшение качества материала (снижение его объемной массы, повышение прочности) и, в связи с этим, увеличение возможностей его использования.

Переход на современные технологии использования биотоплива в России позволит снизить экологический ущерб, повысить надежность теплоснабжения, прежде всего, в лесных районах страны. В развитии рынка биотоплива заинтересованы собственники леса, производители биотоплива, энергетики и государство [2]. У древесины есть серьезный недостаток – повышенная влажность. В результате сушки древесный материал из природного сырья превращается в промышленный материал, который отвечает разнообразным требованиям, предъявляемые к нему в различных производственных и бытовых условиях. При снижении влажности древесины улучшаются ее физико-механические и эксплуатационные свойства [3].

### **Актуальность работы**

Биомасса, аккумулирующая в себе солнечную энергию в форме углеводов растительного происхождения, служит исходным сырьем для выработки биотоплива в твердом, жидком и газообразном виде в зависимости от технологии переработки. Развитие биоэнергетики в России является весьма актуальной задачей, так как имеющийся ресурсный потенциал биомассы России практически неисчерпаем.

Одной из проблем использования биомассы в качестве топлива является сушка. Ее эффективность во многом определяется возможностью оперативного управления процессом. Одним из результативных методов поиска путей повышения эффективности процесса влагоудаления является математическое моделирование [3]. Данный метод позволяет учесть

наибольшее количество факторов и явлений, которые влияют на реальное протекание процесса сушки.

Данная проблема актуальна, так как для современной науки и техники нужен точный прогноз процессов тепло – и массопереноса, экспериментальные исследования которых, очень дорогостоящие и сложные, а иногда и попросту неосуществимы. С помощью математического моделирования без привлечения экспериментов возможно повысить точность расчета и реализовать потенциал энергосбережения при сохранении качества высушенного изделия [4].

**Цель работы:** теоретическое исследование влияния теплофизических свойств материалов растительного происхождения на процесс сушки и анализ процесса тепломассопереноса при сушке влажной древесины различного типа.

**Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:**

1. Анализ современных литературных источников по теме диссертации;
3. Формулировка математической модели процесса сушки древесной биомассы;
4. Оценка достоверности теоретических результатов;
5. Осуществление численного расчета в системе MATLAB;
6. Анализ результатов;
7. Формулировка выводов по результатам численного исследования.

**Практическая значимость** результатов работы заключается в разработке физической теории и обеспечивающей её математической базы, позволяющей моделировать процессы тепло и массопереноса протекающих в условиях интенсивных фазовых превращениях при конвективно–радиационной сушке влажной древесины. Последнее, будет способствовать

разработке теоретических основ, которые станут базой для государственных и отраслевых стандартов при проведении НИОКР (научно-исследовательские и опытно конструкторские работы) при разработке сушильных агрегатов древесной биомассы. Также проведенные расчеты дают возможность применения сформулированной математической модели для выбора эффективных режимов сушки древесины.

### **Достоверность полученных результатов**

Для оценки адекватности результатов численного моделирования проведено тестирование использованного численного метода решения системы нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими краевыми условиями (п. 3.3) на примере менее сложных задач теплопроводности.

# ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ.

## 1.1. Биомасса, виды, достоинства и недостатки

Биомасса или биоматерия — это масса животных, а также растительных организмов, присутствующих в экосистеме в момент исследования.

На протяжении многих лет люди используют биомассу как источник энергии, строительный материал, пищи. Биомасса способна обеспечить большие объемы полезной энергии, гораздо меньше воздействуя на окружающую среду.

Поэтому в настоящее время ведутся разработки систем и исследования для переработки и конвертации биомассы в электричество, жидкое, твердое и газообразное топливо, тепловую энергию, и т.п. [1].

В данной статье изучены гидро- и теплофизические свойства древесных тканей главных и кустарниковых пород, позволяющие обосновать ассортимент и таксационные характеристики растений, используемых в защитных насаждениях степной зоны.

Проведено исследование влагопереноса и тепловых свойств древесины кустарниковых пород четырех видов сосен.

Биомасса – это все возобновляемые за достаточно короткие промежутки времени органические материалы. Она не занимает первое место по запасам из всех доступных источников энергии после угля, урана, нефти и природного газа, однако является альтернативным источником.

«Зеленая энергия» – это энергия, полученная за счет биотоплива. Оно имеет возможность быть использовано как «чистое» топливо для производства тепла и электрической энергии от небольших газовых турбин, дизельных двигателей и котлов. Кроме этого разнообразие химических

веществ, которые могут быть получены или извлечены, содержит смолы агрохимикатов, пищевые ароматические соединения, минеральные удобрения и т.д.

Использование биомассы может проводиться в следующих направлениях:

- прямое сжигание;
- производство биогаза из сельскохозяйственных и бытовых отходов;
- производство этилового спирта для получения моторного топлива.

Развитие биоэнергетики в России является весьма актуальной задачей, так как имеющийся ресурсный потенциал биомассы России практически неисчерпаем.

Основные преимущества биомассы:

1) Биомасса – возобновляемый источник энергии. Это значит, что она не может быть исчерпана как ископаемые виды топлива.

2) Биомасса предотвращает изменение климата, путем сокращения выбросов парниковых газов. Хотя использование биомассы связано с определенным уровнем выбросов, но этот уровень значительно меньше, чем у доминирующих источников, популярных в настоящее время.

3) Чистая окружающая среда. Биомасса способствует очищению окружающей среды. Население планеты постоянно увеличивается, и с увеличением населения также существует проблема увеличения отходов, которые должны быть утилизированы.

4) Биомасса – широкодоступный источник энергии. Есть множество потенциальных источников биомассы, а это одно из главных преимуществ использования энергии перед ископаемым топливом.

Недостатки:

1) Главный минус лиственной древесины — ее быстрое загнивание. Впрочем, бороться с этим помогает обработка различными антисептическими препаратами и сушка. Применяются такие пиломатериалы

для изготовления внутренних архитектурных элементов, для обшивки перегородок и стен, подшивки потолков и прочих плотницких работах.

2) Не допускается пользоваться в «свободных от выбросов СО в регионах», то есть в районах, где действуют предельные нормы СО<sub>2</sub>, и в этом случае трудно реализовать перевод отопления домов на биомассу.

3) Необходимо иметь достаточно большие площади для хранения и складирования пеллетов.

4) Способ сжигания биомассы.

Беря во внимание то, что прямое сжигание биомассы представляет собой достаточно старейшую и наиболее развитую технологию получения энергии из биомассы, до сих пор имеется потенциал для ее дальнейшего развития с точки зрения увеличения КПД и улучшения экологических характеристик. Обычно биомассой заменяют нефть и бурый уголь[3].

## 1.2. Состав и энергетическая ценность, данные о биомассе

Наиболее известны три вида биомассы, из которых получается большое количество тепловой энергии: отходы древесины, отходы сельского хозяйства и твердые городские отходы. Древесные отходы возникают на всех этапах ее заготовки и переработки.

Топливом из древесины могут служить и отходы, образующиеся при рубке леса, а также отходы деревообрабатывающей промышленности:

– ветки, сучки, пеньки, опилки, обрезки, зелень, древесная пыль, горбыль, щепа, кора.

В таблице 1.2.1 приведены данные энергоемкости для сравнения [5].

Таблица 1.2.1- Сравнительные данные энергоемкости

Вид	Содержание воды, %	МДж/кг	КВт·ч/кг
-----	--------------------	--------	----------

Щепа ели	20	12,6	3,5
Древесина лиственных пород	20	14,76	4,1
Древесина хвойных пород	20	15,84	4,4
Бурый уголь	20	10,0-20,0	5,5
Солома	15	14,3	3,9

В статье [6] приводятся результаты исследования влияния тепла и влаги на экстрагирование фурфурола и формальдегида из древесины бука и дуба. Приводятся рекомендации по снижению воздействия вредных веществ на окружающую среду.

В [7] описана структура дерева.

В [8] подробно описан химический состав древесины.

Наиболее распространенными элементами, с химической точки зрения, которые вырабатывают различные типы клеток – целлюлоза и лигнин.

Структура дерева включает в себя такие химические соединения, как , кислоты, масла, вода, минеральные соли, жиры, а также различные вещества - танин, углеводы, пигменты, фенол, и сложные образования, которые придают древесине различные свойства и окраску.

Каждая порода древесины отлична от других как по по существующему соотношению целлюлоза – лигнин разнообразию и количеству этих элементов, так и; а в рамках каждой породы существуют различия, вызванные различными местными климатическими условиями: характеристиками грунта, температурой, влажностью и.т.д.

В [9] проведены экспериментальные исследования закономерностей термического разложения шести разновидностей древесной биомассы в диапазоне изменения температур до 600 °С при различных скоростях нагрева материалов. Установлено, что выход твёрдых (углистое вещество), жидких (биотопливо) и газообразных (биогаз) продуктов почти не зависит от темпа

нагрева. Полученные результаты являются основой для разработки мероприятий по повышению энергоэффективности технологических процессов термической конверсии биомассы.

Основные данные о биомассе:

- Наземные растения 1 800 млрд тонн.
- Живая материя – 2 000 млрд тонн.
- Ежегодное потребление человечеством – 400 ЭДж (12ТВт) энергии.
- На Земле появляется 400 000 млн. тонн биомассы ежегодно.
- Доля биомассы в этом потреблении – 55 ЭДж в год (1.7 ТВт).
- Около 400 тонн биомассы приходится на одного человека [10].

В [11] представлены данные по потенциалу биомассы растительного происхождения на территории Российской Федерации, определен теоретический выход биогаза из различных биомасс при анаэробной технологии переработки. Приведена общая система уравнений, описывающая динамику всех стадий процесса и типичный график изменения выхода биогаза.

В данной статье [12] изучены гидро– и теплофизические свойства древесных тканей главных и кустарниковых пород, позволяющие обосновать ассортимент и таксационные характеристики растений, используемых в защитных насаждениях степной зоны.

Проведено исследование влагопереноса и тепловых свойств древесины кустарниковых пород четырех видов сосен.

В статье [13] авторами был проведен термический анализ древесной биомассы для разработки способов повышения эффективности ее энергетического использования в котельных агрегатах малой и средней мощности.

В данном разделе приведен обзор статей, тематика которых – анализ теплотехнических характеристик древесного биотоплива и его энергетическая ценность.

Содержание влаги в биотопливе играет значительную роль, из – за чего процесс сушки является энергозатратным и существует промышленный интерес в использовании топлива с высоким содержанием влаги. Здесь достаточно перспективны термогравиметрический и кинетический анализы биотоплива, в результате которых можно получить зависимости, например скорости убыли массы от температуры и т.д. Поэтому знание некоторых специфических особенностей биомассы позволит обеспечить квалифицированную разработку и проведение мероприятий для экономически и экологически эффективной работы котлоагрегатов.

В [14] описываются понятия свободной и связанной влаги.

Свободная влага - это влага, которая содержится в сосудах и трахеидах в виде лимфы и которая проходит во все части дерева, питая его. Количество свободной влаги всегда достаточно высокое (свыше 25-30%), и она представляет собой большую часть влаги дерева. Удаляется свободная влага легко и быстро.

Связанная влага – это влага присутствует также в структуре самого дерева и удерживается внутри стенками клеток. Эта так называемая связанная вода, которая начинает испаряться только после полного удаления свободной воды. Процесс удаления связанной воды является более трудным и продолжительным.

В [15] представлена информация о плотности древесины.

Удельная плотность – это соотношение между полностью сухим деревом и его конечным объемом (после усадки) при 0% влажности (сухой объем или обезвоженный). Толстые стенки и узкие просветы между клетками указывают на наличие плотной древесины. Наоборот, если в разрезе дерева имеются тонкие стенки и большие просветы, в этом случае речь идет о древесине с низкой плотностью. Более плотная древесина обычно подвергается сушке более тяжело; наоборот, более легкая и менее плотная древесина легче высушивается, так как часто более проницаема, чем плотная древесина.

В [16] дается понятие гигроскопичности.

### **1.3. Биоэнергетика, современное состояние.**

#### **Древесное биотопливо как альтернативный источник энергии**

На Россию также распространяются все те аспекты, при которых развитые страны непрерывно работают в области использования биоэнергетики. Есть некая специфика, вызванная нынешним состоянием экономики и общества. Работы по биоэнергетике в России могут быть направлены на решение социальных проблем, повышение качества жизни населения, развитие малого бизнеса, снижение уровня безработицы, уровня образования и культуры. В этом и состоит главная особенность использования биоэнергетики. За счет снижения вредных выбросов от энергетических установок, возможно, снизить экологическое напряжение, существующее в ряде городов и в зонах отдыха. Решение проблемы состоит в использовании биомассы для производства доступного топлива и энергии: электрической и тепловой.

Другой проблемой является обеспечение энергией отдаленных районов, которые не подключены к сетям энергосистем. В такие районы как – Дальний Восток, Крайний Север, и Сибирь ежегодно завозится около 6—8 млн. тонн жидкого топлива (мазут, дизельное топливо) и 21—26 млн. тонн твердого (уголь). Таким образом, увеличиваются транспортные расходы, что в свою очередь повышает стоимость топлива. Например в Республике Алтай, Республике Тыва, и на Камчатке >370 долл./тонн у. т. Централизованные системы энергоснабжения охватывают лишь 1/3 территории страны. Надежное энергообеспечение отдаленных районов сложная и дорогая для государства задача [18].

Цель развития биоэнергетики в России:

– развитие рынка и производства энергетического оборудования,

–усовершенствование и развитие технологий использования биоэнергетики для надежного экологически чистого энергообеспечения потребителей за счет возобновляемых источников энергии в районах, где нет возможности подключения к централизованным сетям энергоснабжения,

– освоение технологий и эффективного использования сетевого тепло – и электроснабжения на базе возобновляемых источников энергии,

– расширение производства и использование тех видов топлив, которые могут быть получены из различных видов биомассы.

Биоэнергетика для России – это возможность создать такие современные условия труда и быта для жителей сельской местности, которые обеспечат:

–увеличения производства электрической и тепловой энергии на базе биоэнергетики;

– повышение экобезопасности в районах со сложной экологической обстановкой.

Прирост биомассы на Земле ежегодно составляет 220 млрд. тонн, это в свою очередь позволяет запасать в виде энергии химических связей до  $4 \times 10^{21}$  Дж энергии.

В настоящее время предполагают [18–19], что биомасса обеспечивает энергией

–10–14% потребителей в мире;

– 25% энергии биомассы приходится на промышленно развитые страны

–75% идет на развивающиеся страны.

В статье [20] приведены методика и результаты расчета себестоимости производства теплоты в котельных, которые работают на различном древесном топливе. Показано, что каменный уголь и древесная щепа дают одинаково низкую себестоимость теплоты, а мазут и древесные гранулы – одинаково высокую. Отходы лесопиления (кора и опилки) обеспечивают

минимальную себестоимость теплоты при сжигании их в местах образования.

Автор отмечает, что в области малой энергетики, основные направления политики:

- применение древесной щепы в местах заготовки леса;
- использование древесных отходов лесопиления;
- развитие экспортного производства древесных гранул и древесного угля.

В статье [23] проанализирована возможность использования биомассы в качестве возобновляемого источника энергии в мире, некоторых странах и России со стороны охраны окружающей среды, энерго–ресурсоснабжения. На основании проведенного анализа данной проблемы определены основные энергетические направления конверсии биомассы в различные виды биотоплива, предложена классификация биотоплив по поколениям в зависимости от вида исходного сырья.

В данном разделе приводится обзор научных работ связанных с оценкой биотоплива, как альтернативного источника энергии.

В настоящее время все чаще древесные отходы поставляются на предприятия, которые занимаются производством пеллет. В этом случае необходимо соблюдение требований к подготовке сырья, важным из которых является низкая влажность, в целях снижения энергетических затрат на производство.

Необходимым оборудованием для переработки древесины (производство пеллет) и др. материалов является: грануляторы, сушильная и дробильная аппаратура, пеллетный котёл.

В качестве альтернативного топлива применение такого рода отходов позволило бы решить следующие задачи: получить дешёвую энергию; утилизировать отходы; сократить отчуждаемые земли под новые полигоны захоронения твердых бытовых отходов; снизить затраты на захоронение; уменьшить отрицательное воздействие на окружающую среду.

#### 1.4. Обзор и оценка потенциала лесов томской области

В работе [25] показана энергетическая продуктивность лесов Томской области (рисунок 1.4.1).

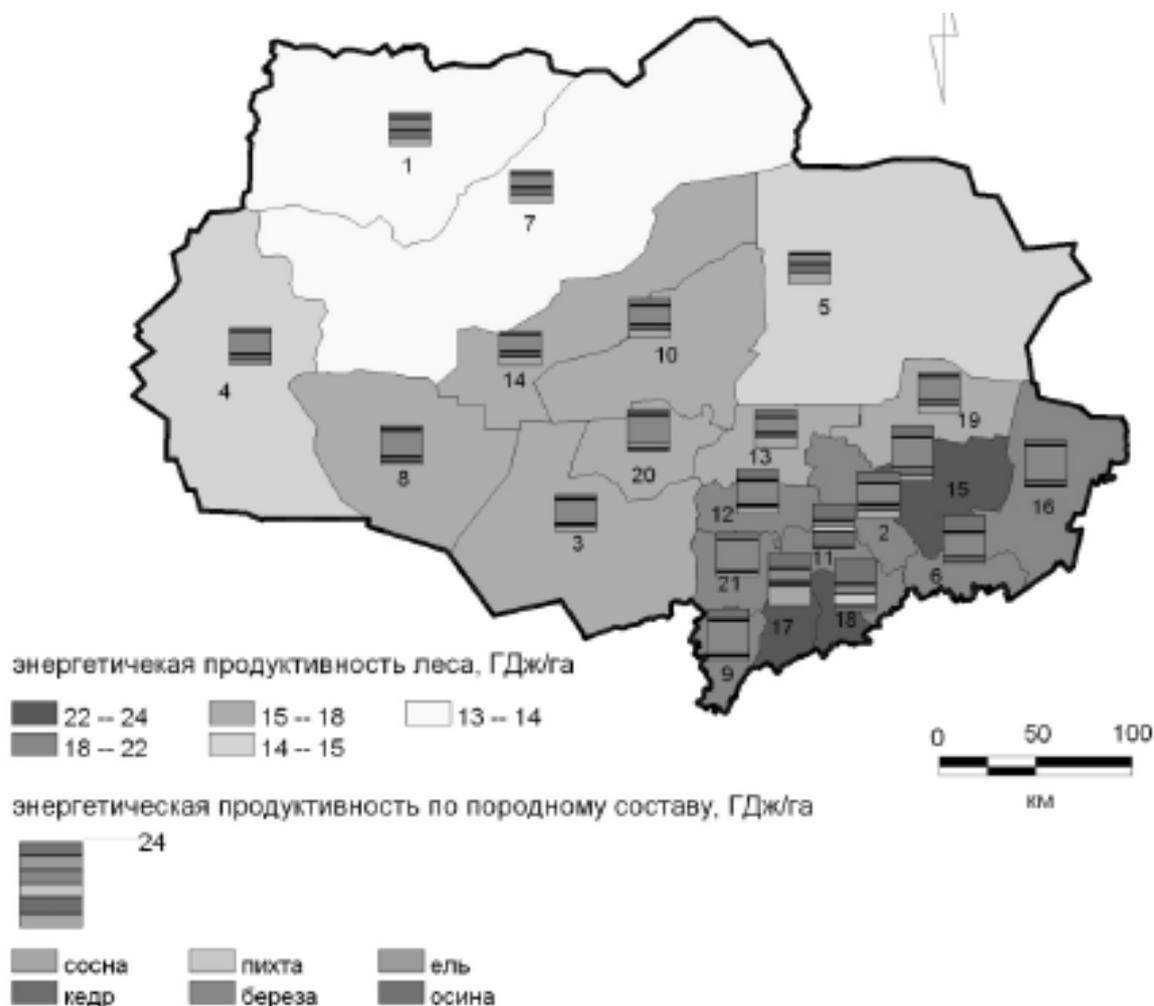


Рисунок 1.4.1 – Энергетическая продуктивность лесов Томской области  
Лесничества: 1–Александровское, 2–Асиновское, 3–Бакчарское, 3–Васюганское, 5–Верхнекетское, 6–Зырянское, 7–Карагасокское, 8–Кедровское, 9–Кожевниковское, 10–Колпашевское, 11–Корниловское, 12–Кривошеинское, 13–Молчановское, 14–Прабельское, 15–Первомайское, 16–Тегульдетское, 17–Тимирязевское, 18–Томское, 19–Улу-Юльское, 20–Чаинское, 21–Шегарское

В статье [26] представлена оценка энергетического потенциала покрытых лесом земель с учетом теплотворной способности древесины и величины среднего прироста различных лесообразующих пород.

В статье [27] на основании ресурсов Томской проведенных расчетов пространственного потенциала проанализирован биоэнергетический потенциал лесных области . С помощью ГИС общим запасам и по приросту фитомассы - технологий проведена оценка по основным лесообразующим породам в рамках распределения биоэнергетического лесничеств.

Расчеты, объективную оценку проведенные рубок и организации с позиции энергетического анализа, дают состояния лесного фонда освоению и могут быть использованы для составления планов работ лесов. Отмечается целесообразность использования древесно-энергетического потенциала в западных районах области для нужд местного населения.

В данной главе рассматривается биоэнергетический потенциал лесов.

### **1.5. Теоретические сведения о сушильном процессе**

В [28] подробно описаны такие способы сушки древесины как: вакуумная сушка, атмосферная, камерная, сушка в СВЧ, сушка конденсационным способом.

Наиболее дешевый и простой способ сушки – атмосферный, т.к. он не требует таких капитальных затрат, по сравнению с камерной. Недостаток – для данного способа сушки необходимы большие площади и большой запас материала, также процесс является неуправляемым, а именно в регионах с повышенной влажностью воздуха возрастает вероятность поражения пиломатериалов грибами, а в районах где сильная жара — растрескивания.

Конденсационные сушилки используются тогда, когда электроэнергия как энергоноситель наиболее дешевая по сравнению с другими видами. КПД

СВЧ сушка аналогична диэлектрической сушке токами высокой частоты. Достоинства заключаются в качестве сушки, они близки к естественной, высокая скорость, средние энергозатраты, мобильна, имеет малые размеры. Недостатки обусловлены высокой стоимостью оборудования, трудностью контроля процесса, частотой случаев возгорания материала изнутри, а так же малым объемом одновременно высушиваемых пиломатериалов. В камерных сушках процесс происходит в конвективных камерах. Такие камеры характеризуются по следующим признакам: устройству ограждения, принципу действия, циркуляции агента сушки и виду теплоносителя.

В [29] даны сведения о свойствах сушильных агентов, а также древесины значимых в процессах сушки. Описаны технология и оборудование для сушки.

Приводятся результаты исследования влияния различных режимов и их структуры на количество фурфурола и формальдегида выделяемого из древесины бука и дуба. Приведены рекомендации по снижению воздействия вредных веществ на окружающую среду.

В работе [35] представлено метод определения температуропроводности на образцах из древесины (сосна) и фторопласта с помощью экспериментальной установки с толстостенными экранами, где образец и экраны выполнены из одного материала.

В [30] приводятся закономерности движения влаги в древесине и характеристика основных процессов.

При сушке в начале испаряется влага снаружи.

Влагопроводность –распределение влаги по объему материала, неравномерное, которое вызывает ее перемещение в стороны пониженной влажности.

Термовлагопроводность – явление движения влаги за счет различной температуры по объему материала, это как раз таки приводит к движению влаги в направлении низкой температуры.

В [31] изложена динамика сушки. Установлено, что главная трудность в осуществлении комплексного сушильного процесса заключается в извлечении, удалении влаги из средней зоны сортимента, т.е. перемещение ее к поверхности. Именно в достижении интенсивного движения влаги внутри материала (из центральной зоны к его поверхности) скрываются возможности получения высоких технико-экономических показателей сушки биомассы.

В статье [32] изложена информация о методах сушки и описана физика этих методов.

Для сушки древесины необходимо: энергия, чтобы извлечь воду из дерева, атмосфера – принять водяной пар; движение воздуха около древесины.

В [33] описаны методы и средства измерения влажности древесины.

Разработка влагомера требует решения ряда взаимосвязанных вопросов технологического и технического характера. Необходимость измерения влажности определяется прежде всего технологическими требованиями деревообработки. Естественно, что решение каких либо задач в области влагометрии невозможно в отрыве от технологического процесса, который должен обслуживать проектируемый влагомер. Результат измерения влажности служит информационным параметром системы управления технологическим процессом. Поэтому эффективное решение вопросов влагометрии древесины в производственных условиях возможно лишь при согласовании параметров и свойств разрабатываемого влагомера, так и с требованиями системы управления куда влагомер входит составной частью.

В статье [34] представлен выбор режима сушки. Описаны мягкий, нормальный и форсированный режимы сушки. Также приведены рекомендации для выбора режима сушки исходя из таких факторов как: порода, толщина и назначение материала.

В [35] описаны дефекты сушки, их причины и предупреждения.

В зависимости от назначения высушиваемых пиломатериалов устанавливается четыре категории качества сушки, т.е. сушка до эксплуатационной влажности, которая обеспечивает возможность:

I категория – механической обработки и сборки деталей и узлов наиболее ответственных изделий.

II категория – механической обработки, а также сборки деталей и узлов квалифицированных изделий.

III категория – сушка для менее ответственных составных частей изделий.

0 категория – сушка до транспортной влажности (16...20)% , т.е. для товарных пиломатериалов (экспортных).

В [36] четко изложена необходимость сушки. Отмечено, что при свежесрубленное дерево достаточно влажное, это не позволяет приступить к его обработке и последующему хранению. Эта влажность должна быть удалена в процессе сушки и в последующем доведена до таких значений конечной влажности, близких к величинам влажности среды, в которой будет материал использоваться.

В [37] приведено сравнение естественной сушки и искусственной.

Преимущество искусственной сушки состоит в возможности создания внутри камеры полностью контролируемого климата, который при этом не зависит от условий внешней среды. Климатические условия изменяются постепенно таким образом, чтобы вызвать удаление влаги из древесины, и это происходит в более короткий промежуток времени по сравнению с естественной сушкой.

Традиционная сушка на открытом воздухе, напротив, очень продолжительна. Это требует больших капиталовложений и создания складских помещений. Уровень конечной влажности не отличается точностью и обычно относительно высок.

В [39] описаны детали сушки с различной начальной влажностью материала.

Если после сушки требуется получить древесину с одинаковой конечной влажностью, начальная влажность биомассы должна быть как можно более однородной. К сожалению, это требование очень трудно соблюсти из-за целого ряда причин, влияющих на этот параметр. Необходимо иметь в виду тот факт, что при очень незначительных отличиях в значениях влажности можно сушить древесину одного и того же типа и с различной начальной влажностью. В этом случае значение конечной влажности будет варьировать в такой же степени, что и величины начальной влажности.

Связанная влага находится в клеточных стенках, преимущественно в промежутках между микрофибриллами (подобная волокну структура тонких нитей с эластичной структурой) и частично внутри самих микрофибрилл. Поскольку микрофибриллы в основном ориентированы по направлению продольной оси клетки, удаление связанной влаги приводит к уменьшению толщины клеточных стенок и поперечных размеров клетки. Следовательно, наибольшая усушка древесины должна быть в поперечных направлениях.

Учебное пособие [42] посвящено тепловым расчетам и вопросам рационального проектирования сушильных установок, применяющихся в различных отраслях промышленности. Рассматриваются многообразные способы подвода тепла к сушимым материалам.

В работе [44] проведен анализ недостатков широко используемого в деревообрабатывающей промышленности конвективно-теплого способа сушки пиломатериалов. Предложена система управления процессом конвективно тепловой сушки пиломатериалов, позволяющая минимизировать энергозатраты, исследовать динамику этих процессов и решить задачу об оптимальном расположении нагревательных элементов в сушильной камере.

В статье [45] Проведено математическое моделирование импульсных режимов конвективной сушки пиломатериалов.

В статье авторами был биомассы для городе Архангельске разработки в терм анализаторе S TA 449 F3 Jupiter фирмы способов повышения эффективности ее проведен древесной энергетического расположенного в, Россия. Использования в котельных агрегатах малой и средней мощности. Экспериментальные исследования проводились на синхронном термический анализ «Netzsch. S elb» (Германия). В качестве экспериментальных образцов было Gerätebau GmbH выбрано гранулированное биотопливо с ЗАО «Лесозавод 25»,

В данном разделе приведен обзор статей, где рассматриваются особенности сушки древесины.

Одной из сложных и актуальных задач является исследование динамики сушильного процесса. Зная ее, возможно решить задачу оптимизации энергозатрат в процессе сушки. Поскольку древесина как сырье для последующей обработки материала представляет собой природный биокомпозит, то и режим сушки в основном определяется реакцией компонентов сырья на теплотехническую обработку.

Качество материала, полученного в результате сушки древесины в сушильной камере, определяется во многом режимом сушки, т.е. технологическими параметрами сушки. Эти параметры во многом определяется физическим процессом, основанном на закономерностях теплообмена и массообмена в древесине, поэтому уделяется большое внимание изучению данных закономерностей, возникновению сушильных напряжений и прочностных характеристик, а так же деформаций в деревьях при сушке.

## **1.6. Математическое моделирование процесса сушки древесины**

В [46] было рассмотрено решение внутренней задачи процесса тепломассопереноса применительно к древесным материалам, подвергаемым термическому воздействию.

Авторами предложена экспериментальная установка для сушки измельченных частиц древесины в виде стружек, опилок, технологической щепы.

Приведены результаты экспериментальных исследований по конвективной сушке измельченной древесины.

В статье [47] приведено высокотемпературной сушки математическое описание стадии при древесного. Газификации сырья. Также представлено математическое описание, которое позволяет рассчитать основные параметры установки и определить режимы эксплуатации.

В [7] было рассмотрено решение внутренней задачи процесса тепломассопереноса применительно к древесным материалам, подвергаемым термическому воздействию. Авторами предложена экспериментальная установка для сушки измельченных частиц древесины в виде стружек, опилок, технологической щепы.

Автором данной статьи [8], было отмечено, что построение математических моделей и проведение численных расчетов необходимо осуществлять на основе переменных Лагранжа и использовать тензор конечных деформаций. Модель разработана и представлена в работе.

Автором данной статьи [48], было отмечено, что построение математических моделей и проведение численных расчетов необходимо осуществлять на основе переменных Лагранжа и использовать тензор конечных деформаций.

В статье [36] дается краткий обзор древесина является пористой реагирующей средой, работ по механике реагирующих сред и утверждается,

что на основе массы количества движения состояния получена общая законов сохранения, энергии и уравнения для описания процессов замкнутая система уравнений в частных производных зажигания и горения древесины.

Модель разработана и представлена в работе.

В статье [15] проводился обзор исследования влияния предварительной термохимической обработки на структуру проводящих элементов древесины дуба и механизм процесса конвективной сушки.

В статье [12], автор термохимический предложил древесины, рассмотреть процессы тепломассообмена обработанной как конвективной сушки древесины объекта для материале при нестационарном. Моделирования технологии трудно сохнувших пород. Изучение распределения температурных Целью обработки позволит реально затрат тепловой в теплообмене после химической произвести с достаточной исследования было полей расчет энергии на сушку, а также корректировку существующих точною производить режимов.

На основе разработанной модели проведен сравнительный анализ сушки дисперсных коллоидных капиллярно-пористых материалов при использовании подходов Эйлера и Лагранжа, а также проведены исследования напряжений в пиломатериале во время сушки.

В статье разработана оригинальная физико-математическая модель, которая в комплексе учитывает физическую и геометрическую нелинейности, связанные с использованием тензора конечных деформаций, взаимосвязанность проходящих процессов и зависимость свойств материала от температуры и влагосодержания, а также его анизотропию.

При использовании биомассы для получения тепла и электроэнергии всегда существуют нормы допустимой влажности топлива. Поскольку в биомассе большую часть объема составляет влага, это отрицательно влияет на теплотворную способность топлива, а также на процесс его хранения. Использование относительно сухого топлива повышает эффективность

работы котлов, снижает выбросы в атмосферу, улучшает экономические показатели работы энергосистемы.

Можно сушить отходы сельскохозяйственного производства – (маис, крупы, целлюлоза, барда). Как правило, на выходе получают пеллеты, кубы, или сырье в мешках и тюках. Ил – первичный, вторичный, перебродивший либо неперебродивший (выход в виде твердых гранул). Твердая органика – опилки, щепка, стружка, солома, зеленые отходы (выход в виде пеллет или брикет). Твердые бытовые отходы – легко сгораемые отходы, органические отходы, отходы брожения (выход в виде тюков, пеллет или ворса).

Метод математического моделирования это исследование процессов на математических моделях, с целью предсказания результатов их протекания в реальных условиях. Модель это объект, отличающийся от оригинала всеми признаками кроме тех, которые нужно изучить.

### **Выводы по результатам аналитического обзора**

При изучении современной технической литературы по теме магистерской диссертации было получено большое количество информации о видах и структуре биомассы.

Также была рассмотрена необходимость подготовки биомассы для эффективного использования в энергетике, что как показано, является её основным недостатком. Управление этим процессом требует привлечения математического моделирования, как наиболее дешевого способа оптимизировать процесс сушки. На данный момент разработано достаточно большое количество моделей, однако четкие рекомендации по оптимизации процесса подготовки биомассы отсутствуют.

## ГЛАВА 2. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1. Объект исследования

Объект исследования – древесина хвойных и лиственных пород.

Биомасса, аккумулируя себе солнечную энергию в форме углеводов растительного происхождения, служит исходным сырьем для выработки биотоплива в твердом, жидком и газообразном виде в зависимости от технологии переработки. Развитие биоэнергетики в России является весьма актуальной задачей, так как имеющийся ресурсный потенциал биомассы России практически неисчерпаем [2].

Основные преимущества биомассы:

- 1) Биомасса – возобновляемый источник энергии.
- 2) Биомасса предотвращает изменение климата, путем сокращения выбросов парниковых газов.
- 3) Чистая окружающая среда. Биомасса способствует очищению окружающей среды. Население планеты постоянно увеличивается, и с увеличением населения также существует проблема увеличения отходов, которые должны быть утилизированы.
- 4) Биомасса – широкодоступный источник энергии. Есть множество потенциальных источников биомассы, а это одно из главных преимуществ использования энергии перед ископаемым топливом.

Недостатки:

- 1) Главный минус лиственной древесины — ее быстрое загнивание. Впрочем, бороться с этим помогает обработка различными антисептическими препаратами и сушка.
- 2) Не допускается пользоваться в «свободных от выбросов CO в регионах», то есть в районах, где действуют предельные нормы CO<sub>2</sub>, и в этом случае трудно реализовать перевод отопления домов на биомассу.
- 3) Необходимо иметь достаточно большие площади для хранения и складирования пеллетов.

#### 4) Способ сжигания биомассы [8].

Дерево, как и всякий живой организм, содержит в себе большое количество влаги.

При сушке быстро испаряется влага с поверхности и из наружных слоев. Изнутри влага поступает медленнее и требует определенных условий [30].

Содержание влаги в биотопливе играет значительную роль, из – за чего процесс сушки является энергозатратным [24].

С помощью математического моделирования без привлечения экспериментальных исследований, которые порой очень дорогостоящие и сложные, а иногда и попросту неосуществимы, имеется возможность прогнозировать процесс тепло – и массопереноса при сушке биомассы.

Данный метод позволяет учесть наибольшее количество факторов и явлений, которые влияют на реальное протекание процесса сушки.

### **2.2. Алгоритм решения задачи теплопроводности**

Для исследования процесса сушки в данной работе используется математическое моделирование. Метод математического моделирования это исследование процессов на математических моделях, с целью предсказания результатов их протекания в реальных условиях. Модель это объект, отличающийся от оригинала всеми признаками кроме тех, которые нужно изучить [11].

В моделировании необходимо выделить этапы:

1. Построение модели. Обозначается некий объект, его основные свойства и особенности. Далее строится его математическая модель, учитывающая качественные зависимости, существующие между особенностями данного объекта или явления.

2. Решение математической задачи. На данном этапе разрабатываются алгоритмы и численные методы решения задач на ЭВМ.

3. Интерпретация полученных сведений из математической модели.

4. Проверка адекватности модели. Необходимо, чтобы полученные результаты эксперимента согласовывались с теоретическими следствиями из модели в пределах определенной точности.

5. Модификация модели (усложнение или упрощение модели).

Задача решалась локально – одномерным методом Самарского с применением четырехточечного неявного разностного шаблона [11].

При решении задачи теплопроводности тело разбивается на совокупность узлов. Затем частные производные дифференциального уравнения заменяют на их конечноразностные аналоги, получая систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Температура определяется как локальная характеристика в каждом узле сетки (рисунок). Полученную систему уравнений замыкают граничными условиями и решают численными методами с помощью ЭВМ [11].

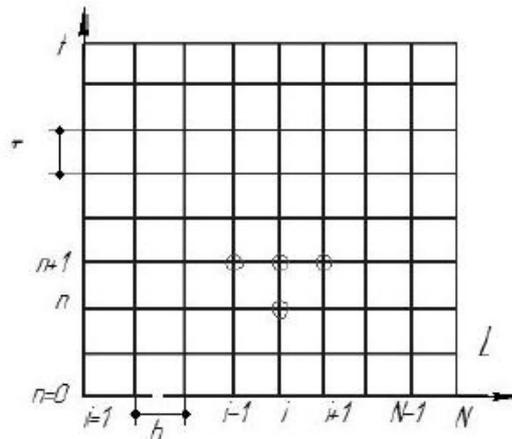


Рисунок 2.1. – Разностная схема

Уравнение теплопроводности имеет следующий вид

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (2.1)$$

Дифференциальные операторы меняем на их конечноразностные аналоги:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\tau}, \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i+1}^{n+1} - 2 \cdot T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}}{h^2}. \quad (2.3)$$

$$\rho \cdot c \cdot \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\tau} = \lambda \left( \frac{T_{i+1}^{n+1} - 2 \cdot T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}}{h} \right), i = 2, \dots, N-1, n \geq 0. \quad (2.4)$$

Трехдиагональный вид разностного уравнения, которое решается методом прогонки:

$$A_i \cdot T_{i+1}^{n+1} - B_i \cdot T_i^{n+1} + C_i T_{i-1}^{n+1}, \quad (2.5)$$

где  $A_i = C_i = \frac{\lambda}{h^2}$ ,  $B_i = \frac{2 \cdot \lambda}{h^2} + \frac{\rho \cdot c}{\tau}$ ,  $F = -\frac{\rho \cdot c}{\tau} T_i^n$ .

Двухточечное уравнение первого порядка:

$$T_i^{n+1} = \alpha_i \cdot T_{i+1}^{n+1} + \beta_i. \quad (2.6)$$

Уменьшая в (2.6) индекс на 1, затем подставляя в (2.5) получим:

$$A_i \cdot T_{i+1}^{n+1} - B_i \cdot T_i^{n+1} + C_i \cdot \alpha_{i-1} \cdot T_{i-1}^{n+1} + C_i \cdot \beta_{i-1} = F_i. \quad (2.7)$$

Откуда получаем:

$$T_i^{n+1} = \frac{A_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}} \cdot T_{i+1}^{n+1} + \frac{C_i \cdot \beta_{i-1} - F_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}, \quad (2.8)$$

где  $\alpha_i = \frac{A_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}$ ,  $\beta_i = \frac{C_i \cdot \beta_{i-1} - F_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}$ .

Для того, чтобы найти  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  необходимо знать  $\alpha_1$  и  $\beta_1$ , которые находятся из левого граничного условия.

Далее по формулам (2.6) находится последовательно  $T_{N-1}^{n+1}, T_{N-2}^{n+1}, \dots, T_2^{n+1}$ , с условием того, что  $T_N^{n+1}$  найдено из правого граничного условия.

Приведена дискретизация нелинейного граничного условия третьего рода с погрешностью  $O(h)$ .

Первые прогоночные коэффициенты  $\alpha_1$  и  $\beta_1$ , на основе левого граничного условия, определены из соотношения  $T_1 = \alpha_1 \cdot T_1 + \beta_1$ :

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \alpha(T_{oc} - T|_{x=0}); \quad (2.9)$$

$$-\lambda \frac{T_2 - T_1}{h} = \alpha(T_{oc} - T_1). \quad (2.10)$$

Введено обозначение  $\frac{\alpha \cdot h}{\lambda} = Bi$ ,

$$T_1 - T_2 = Bi \cdot T_{oc} - Bi \cdot T_1; \quad (2.11)$$

$$T_1 = \frac{1}{1 + Bi} \cdot T_2 + \frac{Bi}{1 + Bi} \cdot T_{oc}; \quad (2.12)$$

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{1}{1 + Bi} = \frac{\lambda}{\lambda + h \cdot \alpha}; \\ \beta_1 = \frac{Bi}{1 + Bi} \cdot T_{oc} = \frac{h \cdot \alpha}{\lambda + h \cdot \alpha} \cdot T_{oc}. \end{cases} \quad (2.13)$$

На основе правого граничного условия, можно определить температуру  $T_N$

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = \alpha(T_{oc} - T|_{x=L}); \quad (2.14)$$

$$\lambda \frac{T_N - T_{N-1}}{h} = \alpha(T_{oc} - T_N). \quad (2.15)$$

$$(2.16)$$

$$T_{N-1} = \alpha_{N-1} \cdot T_N + \beta_{N-1}; \quad (2.17)$$

$$T_N \cdot (1 + Bi) = \alpha_{N-1} \cdot T_N + \beta_{N-1} + Bi \cdot T_{oc}; \quad (2.18)$$

$$T_N = \frac{\beta_{N-1} + Bi \cdot T_{oc}}{1 + Bi - \alpha_{N-1}}; \quad (2.19)$$

$$T_N = \frac{\lambda \cdot \beta_{N-1} + h \cdot \alpha \cdot T_{oc}}{h \cdot \alpha + \lambda(1 - \alpha_{N-1})}. \quad (2.20)$$

Способ аппроксимации производных неявный, поле температуры на новом временном слое представлено неявно, т.е. для его определения необходимо решать систему уравнений полинейно вдоль горизонтальных линий используя метод прогонки.

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

Студент:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5БМ5Г	Дятчина Анна Сергеевна

<b>Институт</b>	<b>ЭНИН</b>	<b>Кафедра</b>	<b>ТПТ</b>
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Теплоэнергетика и теплотехника

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

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Определение и анализ трудовых и денежных затрат, направленных на реализацию научного исследования</i>
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность»</i>
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Ставка по отчислениям во внебюджетные фонды.</i>

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

<i>1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>Оценка перспективности проведения научного исследования. Практическое применение данных исследований</i>
<i>2. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>Определение этапов работы, трудоемкости работы, составление план-графика, сметы затрат.</i>
<i>3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>Определение научно-технической результативности НИР.</i>

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

<ol style="list-style-type: none"> <li><i>1. График проведения и бюджет НИР</i></li> <li><i>2. Оценка научно – технической результативности НИР</i></li> </ol>	
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

**Дата выдачи задания для раздела по линейному графику**

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Попова Светлана Николаевна	к.э.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5БМ5Г	Дятчина Анна Сергеевна		

## **ГЛАВА 5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

Целью данного раздела работы является технико – экономическое обоснование научно – исследовательской работы (НИР). Оно проводится с целью определения и анализа трудовых и денежных затрат, направленных на реализацию НИР, а также уровня научно – технической результативности НИР.

Для достижения поставленных целей данного раздела поставлены следующие задачи [50]: оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научного исследования; определение возможных альтернатив проведения научного исследования, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения; организация и планирование работ; расчет трудоемкости выполненных работ; расчет сметы затрат на исследование; оценка научно – технической результативности НИР.

### **5.1. Оценка перспективности проведения научного исследования**

Переход на современные технологии использования биотоплива в России позволит снизить экологический ущерб, повысить надежность теплоснабжения, прежде всего, в лесных районах страны. В развитии рынка биотоплива заинтересованы собственники леса, производители биотоплива, энергетики и государство. Одной из проблем использования биомассы в качестве топлива является сушка. Целью возможностей его использования. сушки является улучшение качества связи с этим, увеличение материала (снижение его объемной массы, повышение прочности) и, в.

Поэтому данное исследование может вызвать интерес у различных фирм, заводов, компаний, производителей, чья деятельность связана с теплоэнергетикой или с высушенной древесиной. Также результатом

исследования могут ознакомиться и изучить те, у кого возник интерес к анализу и исследованию процесса сушки древесного биотоплива.

Продуктом проекта будут результаты расчета процесса сушки древесного биотоплива и анализ влияния различных теплофизических свойств материала на данный процесс. Так же в результате работы будет предложен оптимальный режим сушки, который позволит качественно и с наименьшими затратами времени и средств высушить древесину для дальнейшего использования ее в теплоэнергетике, деревообрабатывающей промышленности и т.п.

Конкурентами является исследователи, теоретики и экспериментаторы в области анализа процесса сушки.

## 5.2. План работ

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо оптимально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ.

Планирование комплекса:

- распределение структуры работ;
- определение участников работ;
- продолжительность работ;
- построение графика проведения проекта.

Порядок составления этапов, работ и распределение исполнителей по данным видам работ приведены в таблице 4.2.1.

Таблица 4.2.1 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
	2	Оформление технического задания	Руководитель
Подбор и исследование раннее	3	Подбор литературы и обзор статей	Студент

проведенных работ		на данную тему	
Теоретические исследования	4	Разработка методики проведения математического моделирования	Руководитель, студент
	5	Разработка математической модели процесса сушки биомассы	Руководитель, студент
	6	Решение задачи с применением средств и программы MatLab	Студент
	7	Обработка результатов численного моделирования	Студент
	8	Анализ результатов	Студент
	9	Работа над разделом «Фин. менеджмент, ресурсоэфф. и ресурсосбереж.»	Студент
	10	Работа над разделом «Соц. ответ-ть»	Студент
Оформление работы	11	Оформление проделанной работы	Студент
Проверка	12	Проверка работы	Руководитель

$$t_{\text{ож}} = \frac{3 \cdot t_{\text{min}} + 2 \cdot t_{\text{max}}}{5}, \quad (4.2.1)$$

где  $t_{\text{min}}$  – минимальная трудоемкость работ, чел/дн.;

$t_{\text{max}}$  – максимальная трудоемкость работ, чел/дн.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести в календарные дни. Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях,  $T_{\text{рд}}$  ведется по формуле

$$T_{\text{рд}} = \frac{t_{\text{ож}}}{K_{\text{вн}}} \cdot K_{\text{д}}, \quad (4.2.2)$$

где  $t_{\text{ож}}$  – трудоемкость работы, чел/дн.;

$K_{\text{вн}}$  – коэффициент выполнения работ ( $K_{\text{вн}}=1$ );

$K_{\text{д}}$  – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсации и согласование работ ( $K_{\text{д}}=1,2$ ).

Расчет продолжительности этапа в календарных днях,  $T_{кд}$  ведется по формуле:

$$T_{кд} = T_{рд} \cdot T_{к}, \quad (4.2.3)$$

где  $T_{к}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности,  $T_{к}$  рассчитывается по формуле:

$$T_{к} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вд} - T_{пд}}, \quad (4.2.4)$$

где  $T_{кал}$  – календарные дни ( $T_{кал} = 365$ );

$T_{вд}$  – выходные дни ( $T_{вд} = 52$ );

$T_{пд}$  – праздничные дни ( $T_{пд} = 12$ ).

$$T_{к} = \frac{365}{365 - 52 - 12} = 1,213$$

Формулы (4.2.1) – (4.2.4) рассчитывались по [50]. В таблице 4.2.2 приведена длительность этапов работ и число исполнителей, занятых на каждом этапе.

Таблица 4.2.2 – Трудозатраты на выполнение проекта

№ п/п	Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Длительность работ, чел/дн.			
			$t_{min}$	$t_{max}$	$t_{ок}$	$T_{РД}$		$T_{КД}$	
						Р	С	Р	С
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	1	1	1	1	-	1	-
2	Оформление технического задания	Руководитель	1	2	2	2	-	2	-
3	Подбор литературы и обзор статей на данную тему	Студент	10	35	20	-	24	-	29
4	Разработка методики проведения математического моделирования	Руководитель, студент	5	10	7	4	4	5	5
5	Разработка математической модели процесса сушки биомассы	Руководитель, студент	8	15	11	6	6	8	8
6	Решение задачи с применением средств и программы MatLab	Студент	18	50	31	-	37	-	45
7	Обработка результатов численного моделирования	Руководитель, студент	7	20	12	4	11	9	9

8	Анализ результатов	Студент	2	12	8	-	5	-	11
9	Работа над разделом «Финан. менеджмент, ресурсоэфф. и ресурсосбережение»	Студент	1	5	3	-	3	-	5
10	Работа над разделом «Соц. ответ.»	Студент	2	7	4	-	5	-	6
11	Оформление проделанной работы	Студент	4	10	6	-	8	-	9
12	Проверка работы	Руководитель	1	4	2	3	-	3	-
Итого:					106	20	107	29	126

Результатом планирования – линейный графи (диаграмма Ганта).

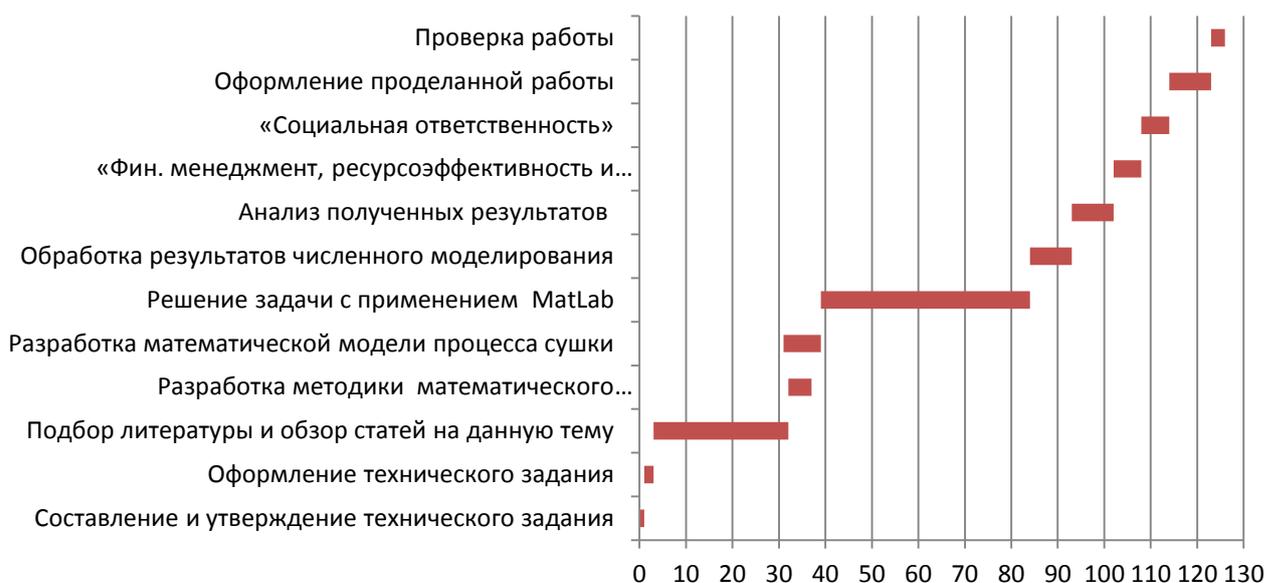


Рисунок 4.2.1– Линейный график работ на основе рассчитанного времени  $T_{кд}$

### 5.3 Расчет сметы затрат на исследование

Таблица 4.3.1- Расходы на материалы

Статьи расходов	Единица измерения	Цена, руб	Объем потребления	Итого, руб.
Канцелярские товары	-	-	-	500
Бумага	Шт. пачек	250	1	250
Электроэнергия	кВт/ч	4,25	24,45	103,91
Компьютер	Шт.	40000	1	50000
Мышка	Шт.	500	1	500
Принтер	Шт.	5000	1	5000
Итого:				46358,38

Таблица 4.3.2 - Потребления электроэнергии

Источник потребления	Мощность потребления, кВт/ч.	Количество часов работы	Общий расход, кВт
Компьютер	0,2	108	21,6
Освещение	0,05	54	2,7
Принтер	0,05	3	0,15
Итого:			24,45

Оплата работы руководителя почасовая. Норма времени на руководство составляет 22 часа. В соответствии с временным положением о порядке нормирования труда научно-педагогических работников, тариф на почасовую оплату работы доцента составляет 300 руб/час, поэтому расходы на оплату труда определяются как:

$$C_{з.п.} = 22 \cdot 300 = 6600 \text{ руб.}$$

$$\text{Отчисления на социальные нужды } S_{с.н.} = 6600 \cdot 0,3 = 1980 \text{ руб.}$$

$$\text{Суммарные затраты составят: } C_{сум.} = 6600 + 1980 = 8580 \text{ руб.}$$

Таблица 4.3.3 - Амортизация

Объект	Стоимость	Срок службы	Норма в год	Величина в год	Время работы	Количество часов работы	Сумма в час	Стоимость амортизации
Персональный компьютер	40000	5	20	8000	108	2200	3,64	163,8
Принтер и МФУ	10000	5	20	2000	3	380	5,26	7,89
								171,69

Таблица 4.3.4 – Смета проекта

Наименование	Единичные расчеты						Суммарные затраты			
	Материалы		Зарплата		Амортизация		Материалы	Зарплата+соц. отчисления	Амортизация	Сумма
	Тариф	Кол-во	Тариф	Кол-во	Тариф	часов				
Проведение расчетов	46358	1	8580	1	-	-	46358	8580	171,69	55110

#### 5.4 Оценка научно–технической результативности научно–исследовательской работы

Оценка научной и научно – технической результативности НИР производится с помощью системы взвешенных балльных оценок. Для

фундаментальных НИР рассчитывается только коэффициент научной результативности (таблица 4.4.1), а для поисковых работ и коэффициент научно–технической результативности (таблица 4.4.2).

Таблица 4.4.1 – Характеристики факторов и признаков научной результативности НИР

Фактор научной результативности	Коэф. значимости фактора	Качество фактора	Характеристика фактора	Коэф. достигнутого уровня
Новизна полученных результатов	0,4	Высокая	Новые результаты позволяющие снизить время и качество сушки	1,5
Глубина научной проработки	0,3	Средняя	Невысокая сложность расчетов, основанная на ранее разработанной модели	0,75
Степень вероятности успеха	0,2	Высокая		2

Таблица 4.4.2 – Характеристики факторов и признаков научно–технической результативности НИР

Фактор научной результативности	Коэф. значимости фактора	Качество фактора	Характеристика фактора	Коэф. достигнутого уровня
Перспективность использования результатов	0,4	Полезная	Результаты будут использованы при последующих НИР и разработках	0,45
Масштаб реализации результатов	0,2	Отдельные фирмы и предприятия	Время реализации: В зависимости от типа древесины и влаги в биомассе	0,45
Завершенность результатов	0,15	Средняя	Рекомендации, развернутый анализ, предложения	0,45

В этом случае коэффициент научно–технической результативности определяется по формуле

$$K_{\text{нр(нтр)}} = \sum_{i=1}^n K_{\text{вли}i} \cdot K_{\text{пи}i}, \quad (4.4.1)$$

где  $K_{\text{вли}i}$  – коэффициент влияния  $i$  – го параметра на научно–техническую результативность;

$K_{\text{пи}i}$  – коэффициент относительного повышения  $i$  – го параметра по сравнению с базовым значением.

Формула (4.4.1) рассчитывались по [53].

Для удобства выполнения расчетов данные сводятся в таблице 5.4.3.

Таблица 4.4.3 – Оценка научно – технической результативности НИР

Параметр	$K_{\text{вли}i}$	$K_{\text{пи}i}$	$K_{\text{вли}i} \cdot K_{\text{пи}i}$
Новизна полученных результатов	0,4	0,8	0,4
Глубина научной проработки	0,3	0,5	0,2
Степень вероятности успеха	0,1	2	0,1
Перспективность использования результатов	0,4	0,4	0,35
Масштаб реализации результатов	0,25	0,4	0,1
Завершенность результатов	0,15	0,5	0,13

Коэффициент научной результативности:

$$K_{\text{нр}} = 0,4 + 0,15 + 0,1 = 0,76.$$

Коэффициент научно – технической результативности:

$$K_{\text{нтр}} = 0,2 + 0,1 + 0,13 = 0,42.$$

В ходе экономического обоснования научно–исследовательской работы была проведена количественная оценка научной результативности НИР и получен соответствующий коэффициент  $K_{\text{нр}} = 0,76$ , а также был рассчитан

коэффициент научно–технической результативности  $K_{нтр}=0,42$ , что показывает высокую результативность проведенной научно–исследовательской работы. Результатом НИР является достижение научного, научно–технического и экономического эффектов.

### **Вывод по главе**

Определены этапы и трудоемкость работы, составлен линейный график работ на основе рассчитанного для инженера и научного руководителя времени  $T_{кд}$ . Рассчитана смета затрат на научное исследование, таким образом, расходы на научно–исследовательскую работу составили  $C = 225099$  руб. В результате проведения математического моделирования, был сделан вывод, при наиболее высоких температурах снижается время сушки и влага испаряется из биомассы быстрее это позволит улучшить качество биомассы для дальнейшей эксплуатации. Следовательно, затраты на научное исследование будут оправданы.

В ходе оценки научной результативности НИР был получен коэффициент научной результативности  $K_{нр}=0,86$ , а также был рассчитан коэффициент научно – технической результативности  $K_{нтр}=0,52$ , что показывает высокую результативность проведенной научно–исследовательской работы.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Bulba, Elena Evgenievna. The Temperature of the Dimethylhydrazine Drops Moving in the Atmosphere after Depressurization of the Fuel Tank Rockets [Electronic resource] / E.E. Bulba, T.Nemova, A. Dyatchina // MATEC Web of Conferences. – Les Ulis: 2016. – Vol. 72: Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy – Technical and Technological Equipment (HMTTSC – 2016). – [01020, 4p.]. –Title screen. – Свободный доступ из сети Интернет.