

**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  
Кафедра теоретической и промышленной теплотехники

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>Математическое моделирование процессов теплопереноса в условиях микроволнового нагрева влажной древесины</b>

УДК 621.1.016.4:674.047:621.3.029

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<b>5Б2Б</b>	<b>Косторева Жанна Андреевна</b>		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Сыродой С.В.	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	Дашковский А.Г.	К.Т.Н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

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

Томск – 2016 г.

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  
Кафедра теоретической и промышленной теплотехники

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой ТПТ  
Кузнецов Г.В.  
(Подпись) (Дата)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы

Студент:

Группы	ФИО
<b>5Б2Б</b>	<b>Косторева Жанна Андреевна</b>

Тема работы:

<b>Математическое моделирование процессов теплопереноса в условиях микроволнового нагрева влажной древесины</b>	
Утверждена приказом ректора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:

10.06.16

**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.).*

Объект исследования – процесс сушки влажной древесины.

Вид сырья – древесины.

Требования к продукту – влажность.

Предмет исследования – моделирование процесса тепло- и массопереноса при радиационно-конвективной сушки влажной древесины.

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></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>	<p>Обзор и анализ литературы, научных публикаций по направлению.</p> <p>Физическая постановка. Формулирование математической модели на основе физической постановки.</p> <p>Результаты численного моделирования</p> <p>Проведение численного моделирования.</p> <p>Верификация программы</p> <p>Проведение численных экспериментов</p> <p>Заключение.</p>
--	---

<b>Перечень графического материала</b>	17 слайдов
--	------------

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Попова Светлана Николаевна, доцент каф. МЕН
Социальная ответственность	Дашковский Анатолий Григорьевич, доцент каф. ЭБЖ

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	26.02.2016
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Сыродой С.В.	к.т.н.		26.02.2016

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б2Б	Косторева Жанна Андреевна		26.02.2016

**Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы бакалавриата по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»**

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Универсальные компетенции</i>	
Р1	Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, в том числе <i>на иностранном языке</i> , разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты <i>комплексной</i> инженерной деятельности.
Р2	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, в том числе междисциплинарном, с делением ответственности и полномочий при решении <i>комплексных</i> инженерных задач.
Р3	Демонстрировать <i>личную</i> ответственность, приверженность и следовать профессиональной этике и нормам ведения <i>комплексной</i> инженерной деятельности с соблюдением правовых, социальных, экологических и культурных аспектов.
Р4	Анализировать экономические проблемы и общественные процессы, участвовать в общественной жизни с учетом принятых в обществе моральных и правовых норм.
Р5	К достижению должного уровня экологической безопасности, энерго- и ресурсосбережения на производстве, безопасности жизнедеятельности и физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
Р6	Осознавать необходимость и демонстрировать <i>способность к самостоятельному обучению в течение всей жизни</i> , непрерывному самосовершенствованию в инженерной профессии, организации обучения и тренинга производственного персонала.
<i>Профессиональные компетенции</i>	
Р7	Применять <i>базовые</i> математические, естественнонаучные, социально-экономические знания в профессиональной деятельности <i>в широком</i> (в том числе междисциплинарном) контексте в <i>комплексной</i> инженерной деятельности в производстве тепловой и электрической энергии.
Р8	Анализировать научно-техническую информацию, ставить, решать и публиковать результаты решения задач <i>комплексного</i> инженерного анализа с использованием <i>базовых и специальных</i> знаний, нормативной документации, современных аналитических методов, методов математического анализа и моделирования теоретического и экспериментального исследования.
Р9	Проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных разработок объектов производства тепловой и электрической энергии, выполнять <i>комплексные</i> инженерные проекты с применением <i>базовых и специальных</i> знаний, <i>современных</i> методов проектирования для достижения <i>оптимальных</i> результатов, соответствующих техническому заданию <i>с учетом</i> нормативных документов, экономических, экологических, социальных и других ограничений.
Р10	Проводить <i>комплексные</i> научные исследования в области производства тепловой и электрической энергии, включая поиск необходимой информации, эксперимент, анализ и интерпретацию данных, и их подготовку для составления обзоров, отчетов и научных публикаций с применением <i>базовых и специальных</i> знаний и <i>современных</i> методов.
Р11	Использовать информационные технологии, использовать компьютер как средство работы с информацией и создания новой информации, осознавать

	опасности и угрозы в развитии современного информационного общества, соблюдать основные требования информационной безопасности.
P12	Выбирать и использовать необходимое оборудование для производства тепловой и электрической энергии, управлять технологическими объектами, использовать инструменты и технологии для ведения комплексной практической инженерной деятельности с учетом экономических, экологических, социальных и других ограничений.
<i>Специальные профессиональные</i>	
P13	Участвовать в выполнении работ по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов теплоэнергетического производства, контролировать организацию метрологического обеспечения технологических процессов теплоэнергетического производства, составлять документацию по менеджменту качества технологических процессов на производственных участках.
P14	Организовывать рабочие места, управлять малыми коллективами исполнителей, к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений, планированию работы персонала и фондов оплаты труда, организовывать обучение и тренинг производственного персонала, анализировать затраты и оценивать результаты деятельности первичных производственных подразделений, контролировать соблюдение технологической дисциплины.
P15	Использовать методики испытаний, наладки и ремонта технологического оборудования теплоэнергетического производства в соответствии с профилем работы, планировать и участвовать в проведении плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ, в том числе, при освоении нового оборудования и (или) технологических процессов.
P16	Организовывать работу персонала по обслуживанию технологического оборудования теплоэнергетического производства, контролировать техническое состояние и оценивать остаточный ресурс оборудования, организовывать профилактические осмотры и текущие ремонты, составлять заявки на оборудование, запасные части, готовить техническую документацию на ремонт, проводить работы по приемке и освоению вводимого оборудования.

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 87 с., 30 рис, табл. 14, 102 источников, приложения отсутствуют.

Ключевые слова: тепломассоперенос, время сушки, испарение, теплопроводность, численные моделирование;

Объектом исследования является: влажная древесина;

Цель работы – математическое моделирование процессов тепломассопереноса в условиях микроволнового нагрева влажной древесины;

В результате исследования были получены времена сушки древесины при различных начальных параметрах и характеристиках заготовки;

Степень внедрения: результаты внедрены в учебный процесс;

Область применения: сушильные камеры.

## Содержание

1. Введение .....	6
2. Обзор литературы.....	7
2.1 Теория и практика микроволновой сушки древесины.....	19
2.2 Актуальность и инновации.....	23
3. Постановка задачи.....	27
3.1 Физическая постановка.....	27
3.2 Математическая модель .....	30
3.3 Тестовые задачи.....	31
4. Анализ и обсуждение результатов.....	37
4.1 Влияние размеров заготовки на динамику сушки.....	37
4.2 Влияние начальной влажности на скорость влагоудаления.....	38
4.3 Влияние коэффициента теплоотдачи на динамику сушки.....	44
4.4 Влияние мощности внутреннего источника на скорость влагоудаления.....	46
4.5 Сравнение микроволнового и конвективного методов сушки.....	47
4.6 Сравнение времен сушки различных видов древесины при идентичных условиях теплообмена .....	48
4.7 Температурные поля внутри образца в момент полного высыхания.....	54
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	57
6. Социальная ответственность.....	65
7. Заключение.....	78
8. Список литературы.....	79

## Введение

В выпускной квалификационной работе (ВКР) приведены результаты математического моделирования задачи сушки влажной древесины. Проведен ряд численных экспериментов по определению времен полной сушки древесины в зависимости от различных начальных параметров (температура сушильного агента и интенсивность теплообмена (коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ )) и характеристиках древесной заготовки (порода и вид древесины, линейные размеры, начальная температура и влажность, зависимость теплопроводности от расположения волокон (вдоль или поперек)). В результате численного решения было определено, что при увеличении температуры внешней среды (сушильного агента) скорость сушки существенно возрастает, при этом повышение интенсивности теплообмена (коэффициента теплоотдачи) оказывает незначительное влияние на время удаления влаги из древесины.

Также в результате численного решения были рассчитаны распределения температур заготовки образца в момент полного высыхания древесины. По результатам данного распределения можно отметить, что возможны такие режимы сушки, при которых могут произойти существенные перегревы приповерхностного слоя образца. Последнее может привести к нарушению прочностных и твердостных характеристик, термическому разложению древесины, а также увеличить риск возгорания приповерхностного слоя образца.

## 1. Обзор литературы

Деревообработка является одной из перспективных отраслей в нашей стране. Это обусловлено во многом географией, площадью лесных массивов и их возможностью к самовозобновлению [1]. За последние годы (около 15 лет) в России начался стремительный рост деревообрабатывающей промышленности, которая нуждается в заготовках из хвойных и лиственных пород. Таким производствам нужна высококачественная обработанная древесная продукция [2]. Поэтому древесина является одним из наиболее востребованных материалов на настоящее время [3].

Интенсивный и экстенсивный характеры роста национальных экономик вынуждают вводить в промышленность высокие технологии, позволяющие удовлетворять стремительно изменяющимся запросам потребителей к изделиям из древесины. Последние должны быть выполнены в кратчайшие сроки [4]. Как правило, на производство привозят не прошедшую предварительную обработку (обрезку коры, распил, сушку и т.д.) влажную древесину [5]. В то время как готовая продукция, должна быть сухой, так как изделия, изготовленные из сырой древесины, со временем изменяют свои свойства (прочность, форму, плотность и т.п.). Процесс сушки является одним из самых энергоёмких процессов в деревообрабатывающей промышленности, значительно увеличивающий себестоимость конечного изделия на 20-30%. Это обусловлено высокой продолжительностью процесса и большими потерями в окружающую среду (инфильтрацией через неплотности наружных стенок камеры и вентиляцией) [2]. Затраты на удаление влаги из древесины составляют до 30% от стоимости сухих пиломатериалов [6].

По мере просыхания древесина улучшает свои технологические характеристики – строгание, шлифовки, распил, прочность склеивания, предотвращение последующей деформации и др. [7]. Одновременно увеличивается прочность материала, уменьшается масса и увеличивается

стойкость к биологическому и термическому разложению [8]. Поэтому неотъемлемой частью подготовки влажной древесины к дальнейшей обработке, является процесс её «обезвоживания», который превращает такое природное сырьё в промышленный материал [9]. При этом стоит отметить, что удаление влаги из древесины является довольно сложным процессом, характер которого определяется совместным протеканием комплекса физических процессов [10] таких как:

- **Конвективный теплообмен**- передача тепла от сушильного агента образцу древесины;

- **теплопроводность** - передача тепла внутри бруска;

- **фильтрация** - перемещение влаги внутри образца в жидком или газообразном состоянии.

Как правило, «обезвоживание» заготовок осуществляется в специальных сушильных камерах. Снижение влажности у древесины может производиться различными способами, например, конвективной (подача к материалу газообразного сушильного агента), кондуктивной сушкой (нагрев горячим «телом» (плитой)), радиационным методом «обезвоживания» (воздействием источником теплового излучения) [8], атмосферной (заготовки складываются в штабели и высушиваются под навесами или в неотопливаемых помещениях, так же возможно складирование и на открытом воздухе), ротационной (основана на использовании центробежной силы), ультразвуковой (влага из древесины удаляется в виде жидкость за счет явления кавитации), вакуумной сушкой (проводится при низком атмосферном давлении) [11].

**Конвективная сушка.** Пиломатериалы укладываются в штабеля и загружаются в сушильную камеру. В последней циркулирует подогретый (до 470 К) сухой воздух [12]. Кроме воздуха в качестве сушильного агента могут использоваться продукты сгорания твердого, жидкого или газообразного топлива, а также перегретый пар. *Недостатками* такого вида сушки являются не рациональное использование энергии установкой, поскольку

сушка материала таким способом сопровождается потерями тепла на нагрев окружающей среды и конструкций. Высокая длительность процесса, так же увеличивает затраты энергии. При детальном исследовании процессов данной сушки возникает необходимость повышать температуру сушильного агента, что влечет перегрев уже высушенного слоя. Последние существенно снижает качество древесины [13]. *Преимущество* такого метода «обезвоживания» - это простота и низкая стоимость оборудования [14].

**Кондуктивной сушкой** «обезвоживают» тонкие и плоские заготовки в форме листов (шпон, фанера и т.д.) [11]. Тепло к листам передается с помощью нагретой плиты (до 150 °С) при непосредственном контакте. Основанным *недостатком* этого метода сушки является низкое качество «обезвоживания» древесины из-за одностороннего подвода теплоты к материалу. Так же существенным недостатком является появление поверхностных термических повреждений в месте сопряжения нагревателя и заготовки в случае чрезмерной выдержке. *Преимущество* заключается в скорости «обезвоживания» заготовок [15].

**Радиационный нагрев** [3]. Заготовки укладываются в ряды и нагреваются под воздействием источников теплового излучения. В камерах в качестве излучателей используют электронагревательные элементы, электроплиты, осветительные электролампы накаливания мощностью от 500 Вт и выше, газовые (беспламенные) горелки. Применяется в основном для обезвоживания лакокрасочных покрытий. Главным *недостатком* этого метода является малая эффективность при сушке крупных заготовок из-за низкой степени проникания инфракрасных волн в материал (глубина проникновения 3-7 мм). С повышением мощности повышается вероятность пересушивания заготовок и увеличивается риск негативного влияния радиационного воздействия на персонал. К *преимуществам* метода относится возможность избирательного поверхностного или глубокого нагрева заготовки [15].

**Атмосферная (естественная) сушка.** Наиболее простой способ сушки пиломатериалов. Она проводится на открытом воздухе под навесом. Заготовки укладывают на фундаменты с зазорами и закрывают крышей от солнечных лучей и попадания осадков [11]. Основным *преимуществом* является отсутствие необходимости установки сложного и дорого технологического оборудования. Однако, есть существенные *недостатки* одними из которых является низкая скорость сушки, низкая возможность регулирования процесса удаления влаги, необходимость в огромных производственных площадях [16]. При этом конечная влажность древесины может составлять более 22%. Стоит отметить, что данный метод сушки не представляется возможным в зимний период времени года [17].

**Ротационная сушка.** При применении метода центрифугирования материал загружается в сушильный барабан (диаметром до 2400 мм), затем этот барабан раскручивается до установленной скорости (угловая скорость 9,1 рад/сек). В результате под действием центробежных сил, влага в древесине перемещается к наружной поверхности барабана, через которую она отводится наружу [18]. К *преимуществам* относится высокая скорость и равномерность сушки материала. Главный *недостаток* такого способа «обезвоживания» влажной древесины - громоздкость конструкции и высокий риск механических повреждений заготовок [11].

**Ультразвуковая сушка.** Основная идея такого метода «обезвоживания» заключается в том, что в камеру укладывается материал и подвергается воздействию ультразвуковых колебаний. В результате происходит понижение вязкости жидкости и под действием сил капиллярного всасывания, вода выступает на поверхность древесины. В последствии, она может быть удалена (сдувом, протирка и т.д.). Применяется в основном в пищевой промышленности (для сушки термолабильных материалов) [19]. Основные *преимущества* данного способа удаления влаги является - отсутствие термообработки материала (сохраняет вкусовые качества продукции, увеличивает срок хранения и т.д). При «обезвоживании»

древесины обеспечивает высокое качество заготовок и низкие энергозатраты. Одним из главных *недостатков* является незначительное снижение влажности в образцах [20].

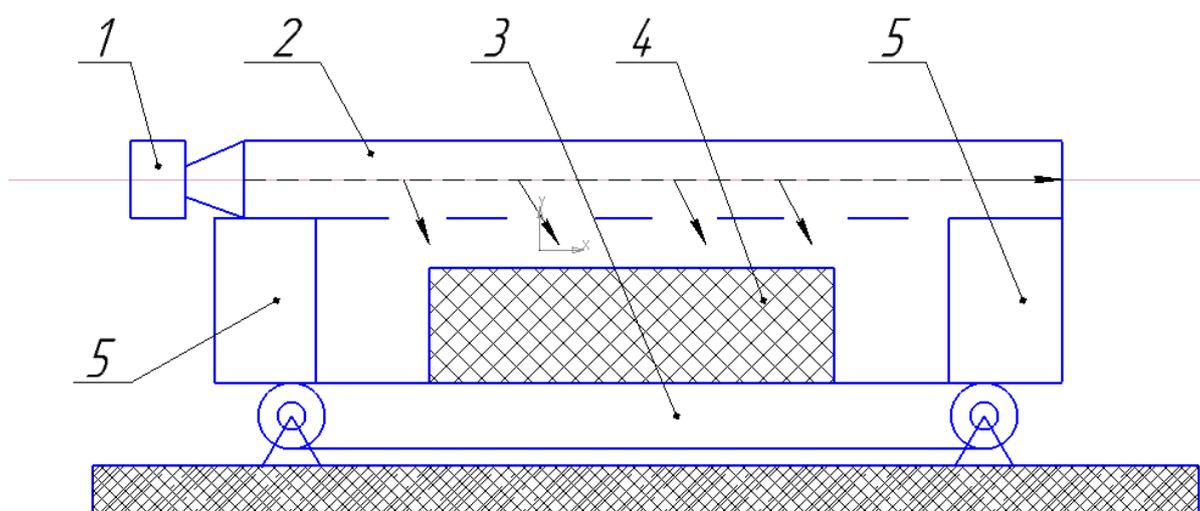
**Вакуумная сушка.** Происходит в специальных герметичных сушильных камерах с предварительным откачкой воздуха (созданием вакуума). Сушка проходит при пониженном атмосферном давлении, следовательно, снижается температура кипения воды. Соответственно, мягкие температурные режимы 46 - 63°C разрежение воздуха способствуют более равномерному изменению влажностных характеристик заготовок. Главным *преимуществом* является высокое качество продукции. К основному *недостатку* можно отнести высокую стоимость и сложность оборудования, а также ограниченные габаритные характеристики сушильных камер [13].

Обобщая всё вышеперечисленное можно сделать вывод что, несмотря на такое разнообразие способов «обезвоживания» древесины на сегодняшний день не существует единого эффективного и подходящего ко всем материалам метода сушки. Каждый из них имеет свои недостатки (поверхностный нагрев материала, медленное изменение температуры, локальный перегрев поверхности заготовки, высока вероятность ( $P \geq 10\%$ ) подгорания дерева и возникновения внутренних термических напряжений) и преимущества (дешевизна, отсутствие термической обработки, высокое качество продукции) [22] перед остальными.

На данной момент нет наиболее универсального метода сушки, по этой причине одним из перспективнейших способов снижения влагосодержания является сверхвысокочастотный нагрев (СВЧ) древесины. СВЧ-нагрев заключается в повышении температуры материала за счет подвода энергии электромагнитного поля сверхвысоких частот ( $\nu =$  от 300 МГц до 300 ГГц) [23]. В настоящее время интенсивно развивается сушка древесины в микроволновых лесосушильных камерах [24].

Возможность одновременного варьирования амплитудно-частотными характеристиками СВЧ-поля ( $f=435, 915$  и  $2450$  МГц) может обеспечить равномерное тепловыделение по всему объему заготовки. Следовательно, снизить угрозу деформаций и разрушения, а также значительно улучшить качество готовой продукции [13]. Эффективная сушка позволяет снизить ущерб для предприятий. Последнее обуславливается применением меньшего и сырья, и рабочей силы [8].

Частоты 435 и 915 МГц применяют для высушивания больших объемов древесины, а источники волн с рабочей частотой 2450 МГц используют в основном для сушки тонких заготовок, так как они имеют малую глубины проникновения в высушиваемый материал [26].



*Рисунок-1 Установка для СВЧ-сушки [27].*

*1-СВЧ-генератор 1 на магнетроне, 2- короткозамкнутый волновод с излучающими щелями, 3-ленточный конвейер, на котором находится обрабатываемый продукт 4 и шлюзовые камеры 5.*

#### Принцип преобразования микроволновой энергии в теплоту:

Заключается в эффективном поглощении влагой нагреваемого образца подводимой к нему энергии СВЧ поля. Подводимая в сушильную камеру микроволновая энергия и теплота, генерируемая во всем объеме диэлектрика, практически полностью им поглощается.

Физическая природа поглощения СВЧ-энергии заключается в следующем, молекулы всех веществ связаны друг с другом силами межмолекулярного взаимодействия. Под действием переменного электромагнитного поля на вещество внутримолекулярные заряды начинают смещаться. На перемещение заряженных частиц затрачивается работа, которая совершается против сил межмолекулярного взаимодействия, играющая роль внутреннего трения, и которая превращается в теплоту. Такое явление называется «диэлектрическим нагревом». Эффективность преобразования энергии переменного поля высокой частоты в тепловую пропорциональна значению коэффициента поглощения энергии (коэффициента диэлектрических потерь), квадрату и частоте напряженности электрического поля в веществе.

Известно, что во всех биологических веществах присутствуют молекулы воды, которые под действием микроволновых волн в рабочем теле приходят в движение. Поле задает молекулам воды строгую ориентацию вдоль собственных силовых линий. При смене направления на противоположное, диполи разворачиваются за ним с большой скоростью. При частоте 2550 ГГц происходит 25500 миллионов колебаний в секунду. За один период волны диполь два раза меняет свое направление с минуса на плюс и обратно [31].

Вследствие проникновения волн вглубь заготовки происходит преобразование энергии в тепло не на поверхности, а в объеме, следовательно, получается более интенсивное повышение температуры при значительной равномерности нагрева по сравнению с традиционными методами сушки [28,29].

Кроме того, при СВЧ-сушке обеспечивается равномерное распределение сверхвысокочастотного электромагнитного поля по объему сушильной камеры [30].

Преимущества применения микроволновой энергии при удалении влаги из древесины заключается в следующем:

- Простота конструкции сушильных камер СВЧ;

- Мобильность установки;
- Существенное снижение массогабаритных характеристик сушильных камер [32];
- Высокое поглощение древесиной электромагнитной энергии [33];
- Быстрый объемный нагрев;
- Возможность осуществления бесконтактного воздействия источником на объект;
- Высокий КПД преобразования СВЧ энергии в тепловую (тепловые потери в подводящих трактах малы) [34];
- Возможность мгновенного включения и выключения источника ЭМП (электромагнитного поля) [32];
- Возможность управления сушкой (управления частотой электромагнитных волн) [33];
- Экологическая чистота, за счет отсутствия вредных выбросов в атмосферу [35];
- Возможность удаления влаги у ценных пород древесины;

В работе [3] Приведены примеры реальных установок для сушки древесины. Проведены их сравнение по основным технико-экономическим показателям.

- Модельный ряд лесосушильных камер КРЭС. В установке происходит комбинированный способ сушки древесины, заключающийся в диэлектрическом нагреве заготовок СВЧ-полем в сочетании с конвективным нагревом. Процесс «обезвоживания» пиломатериалов контролируется с помощью автоматического оборудования. В состав лесосушильных камер КРЭС входят: микроволновые модули, рабочая камера, пульт управления и тепловентиляторы. Данные камеры характеризуются низким энергопотреблением, высокой степенью надежности, короткими сроками окупаемости, высоким качеством удаления влаги, мобильностью, а также значительным повышением прочности древесины в процессе сушки до 65 % [36].

- Малогабаритная волноводная СВЧ-камера для сушки пиломатериалов модели «МС-2» комбинированного типа [37]. Разработчики и производитель – сотрудники ОАО «КОДОС Станкоагрегат» Россия.

- Комбинированного воздействия конвекции и СВЧ-излучения лесосушильные камеры серии КСВЧ. Производитель – ООО «Микротехсервис» г. Харьков, Украина. Камеры предназначены для удаления влаги у любых пород древесины. Управление установкой - автоматическое [38]. Рабочий диапазон температур камеры от 10 до 100 °С.

- Аэродинамические камеры для сушки пиломатериалов модельного ряда КСА. Производитель – ООО «ТАЮР» г. Брянск, Россия. Управление камерой полностью автоматизированное [39].

- В конвективной лесосушильной камере модельного ряда Global kilns с принудительной циркуляцией сушильного агента («Global edge»). Процесс сушки контролируется цифровой микропроцессорной системой. Камеры Global kilns могут быть использованы как для сушки твердых, так и для сушки мягких пород древесины [40].

- Комбинированные вакуумно-конвективные лесосушильные камеры для сушки ценных пород древесины (тик, бук, дуб, мореный дуб, анегри, палисандри др.) модельного ряда ГЕЛИОС-ВАКУУМ от компании «Камі. Искусство технологий» г.Москва, Россия. Управление процессом сушки полностью автоматическое. Камеры могут работать на водогрейных котлах с использованием всех видов топлива [41].

- Индукционные лесосушильные камеры косвенного нагрева СК-10, СК-15 от компании «Станко- Комплект» г. Новосибирск, Россия [42].

- Конденсационные лесосушильные камеры серии АКС от ООО «ТОКО» Россия, Удмуртия с конвективным обдувом и принудительной циркуляцией сушильного агента (хладагента) по замкнутому циклу [43].

Основные технико-экономические показатели описанных лесосушильных установок представлены в таблице 1.

*Таблица 1. Основные технико-экономические показатели описанных лесосушильных установок*

Показатель	Наименование лесосушильной установки							
	КРЭС	МС-2	КСВЧ	Global kilns	Гелиос - Вакуум	СК-10 СК- 15	АСК	КСА
Тип работы	Период и ческий	Комбинированный	Периодический	Периодический	Периодический	Периодический	Периодический	Периодический
Рабочая частота, Гц	2,5* 10 <sup>9</sup>	2,5* 10 <sup>9</sup>		50	-	50	50	-
Объем камеры, м <sup>3</sup>	1,2-20	1,6	20-50	60-180	16-50	22-26	1,3-3	-
Объем загрузки, м <sup>3</sup>	0,5 - 7	1,6	7-15	20-60	4-16	12,5; 16,5.	3-30	6-20
Максимальная потребляемая мощность, кВт	3-14	13	63-103	-	10-45	50,60.	6-10	25-90
Затраты электроэнергии на сушку 1 м <sup>3</sup> , кВт*ч	260-1400	-	400-450	5-13	350	-	4-7	-
Начальная/конечная влажность, %	Снижение влажности от 15%	40/8	-	70/6	50/4 30/5	-	-	40/7
Продолжительность сушки условного пиломатериала при заданных уровнях влажности (доска 35мм)	-	30-60 мин	5-6 дней	-	6-24 дней	-	-	-
Напряжение питания, Вт	220/380	220/380	380	380	380	220/380	380	220/380
Масса, кг	500	280	-	1000-4000	4000-17500	4000	200-260	4000-12000
Стоимость, Тыс. евро.	3-9	12	От 10	15	От 10	20	15-20	6-15
Срок окупаемости, лет	Менее 1	-	-	3	2,5-3	4	2,5	2

---

По результатам сравнения основных технико-экономических показателей сушильных камер можно сделать следующий вывод:

1. Наиболее перспективными методами удаления влаги является СВЧ-сушка или комбинированная «СВЧ вакуумная» сушка;

2. На данный момент самым эффективным является комбинированный СВЧ-нагрев совместно с обдувом потоком горячего воздуха [3].

Моделирование процессов микроволнового «обезвоживания» древесины позволяет рассчитать наиболее эффективный режим качественной обработки различных пород лесоматериала [44]. Комбинирование СВЧ-сушки древесины с другими способами «обезвоживания», например, с конвективным нагревом или с вакуумированием, [45] приводит к существенному сокращению энергозатрат. Последнее обуславливается тем, что при микроволновом воздействии материал нагревается равномерно по всему объему. Соответственно процесс удаления влаги протекает значительно быстрее. Так же применение микроволновой энергии оправдано экономически, потому что СВЧ-генераторы, имеют высокий коэффициент полезного действия преобразования энергии промышленной частоты в микроволновую энергию, дешевые и простые источники питания с большим сроком службы (2000-4000 часов), а также высокую надежность [33].

Перечисленные преимущества показывают эффективность применения СВЧ-сушки. Однако, за последние годы, несмотря на все преимущества микроволнового нагрева, получить высокое качество материала на практике возможно только совмещая СВЧ-нагрев с другими видами сушки [3].

Методы моделирования «обезвоживания» древесины позволяют исследовать многие процессы, например, распределение влаги и температуры, а также электромагнитного поля в диэлектриках. Численное моделирование позволяет более эффективно и оптимально выбирать

конструктивные характеристики сушильных камер. Последнее будет способствовать существенному сокращению затрат процесса сушки влажной древесины, и соответственно, существенно сократить материальные затраты этого процесса. Исключить большое количество дорогостоящих и длительных натурных экспериментов [46-49].

## 1.2 Теория и практика микроволновой сушки древесины.

Процесс удаления влаги из древесины, механизм тепло- и влагопереноса имеет множество проблем, обусловленных физико-механическими свойствами (плотность, теплопроводностью, прочность, влажность, твердость) разнообразных видов древесины (ель, дуб, сосна, берёза, пихта, ясень и др.), так же не мало важным фактором является размер образца, подвергаемый сушки. Всё вышеперечисленное существенно затрудняет совершенствование «обезвоживания» древесины для её дальнейшего использования. [50-55]

Основные положения кинетики процесса сушки были впервые сформулированы русским профессором Коссовичем П.С., занимающимся исследованием перемещением влаги в капиллярно-пористых телах. Позже изучением испарения влаги из почвы занимался А.В. Лебедев [56]. В дальнейшем эти положения успешно развивались Филоненко Г.К [57], Кавказовым Ю.Л [58], Каляевым Ф.Е., Федоровым И.М. [59], Миниовичем Я.М [60]. и др. В 30-ых годах учеными из США - Шервудом Т.К.[61] и Льюисом У.К. был применен аппарат классической теории диффузии к процессу сушки для описания переноса влаги внутри материала.

Далее важным этапом развития теории «обезвоживания» считается установление явления термодиффузии влаги, последние совместно с концентрационной диффузией явилось основой для создания системы дифференциальных уравнения тепло- и влагопереноса в капиллярнопористых телах [62].

На протяжении более чем 40 лет теория углубления поверхности испарения получила своё полное экспериментальное подтверждение. Последними работами [63] удалось установить взаимосвязь между критерием фазовых превращений и скоростью углубления фронта испарения. В результате, теория сушки получила свое завершение.

В теории удаления влаги широко используются методы теории обобщенных теории подобия, созданная в Советском Союзе М. В. Кирпичевым и А. А. Гухманом [64]. Исследования А.А. Гухмана кинетики сушки являются одновременно и дальнейшим развитием теории обобщенных переменных.

В области технологии сушки занимает важное место теория о формах связи влаги с материалом, созданная академиком П. А. Ребиндером [65] вместе с его учениками. Так же большое значение в технологии сушки имеет физико-химическая механика, которая развивалась П. А. Ребиндером. Дальше развитие эти работы получили в исследованиях Г. А. Максимова [66], Ю. Л. Кавказова [58], С. М. Липатова [67].

Метод расчета сушильных устройств был создан профессором Л. К. Рамзиным [68]. Им впервые в 1918 г. была предложена диаграмма влажного воздуха. (рисунок 2)

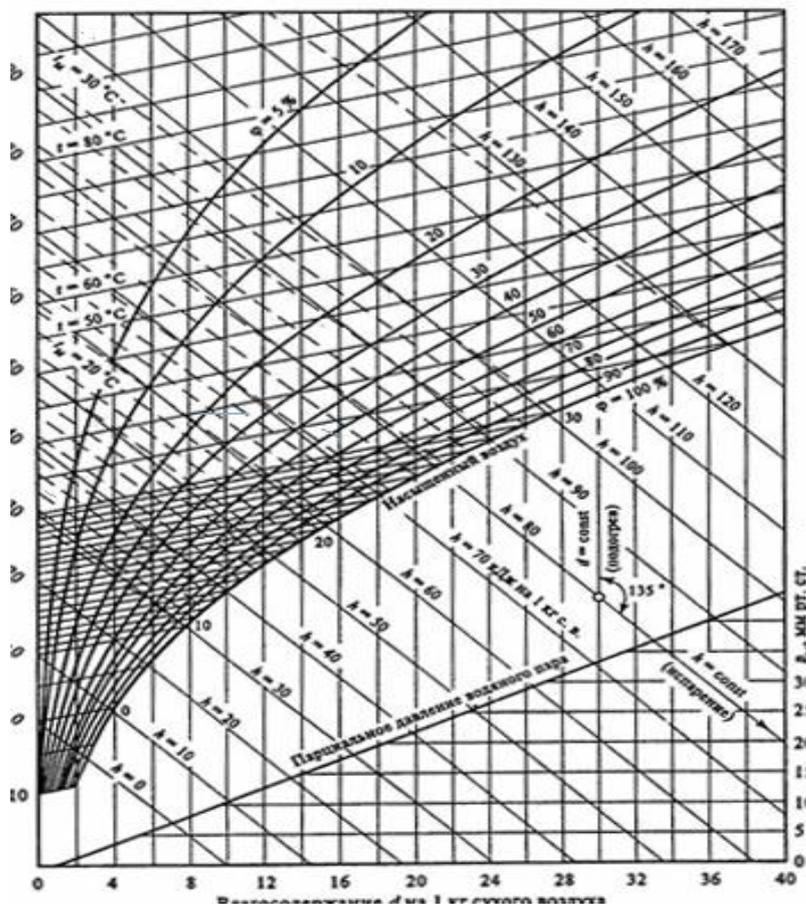


Рисунок- 2. Выкопировка из [8]. Диаграмма влажного воздуха.

Позже исследования в области расчета устройств «обезвоживания» были проведены работниками сушильной лаборатории Всесоюзного теплотехнического института А. П. Ворошиловым [69], И. М. Федоровым [59], Н. М. Михайловым [70] и др. Некоторые уточнения в методике расчета сушильных устройств при «обезвоживании» материалов в гигроскопической области были сделаны профессором И. В. Кречетовым [8] и Щ. Эндрени.

В развитие теории сушки внесли обширный вклад советские ученые П.Д. Лебедев, М. В. Лыков, Ю. А. Михайлов, А. Г. Темкин, М. Ф. Казанский [71], Б.М. Смольский П.Г. Романков [72], А.С. Гинзбург [73], В.В. Красников [74] и др.

Позже исследования А.В. Лыкова помогли создать общую теорию сушки материалов, основой которой являются закономерности переноса влаги и тепла во влажных материалах при взаимодействии их с горячими поверхностями, с нагретыми газами, а также в процессах облучения электромагнитными и звуковыми волнами при наличии фазовых переходов.

Важную роль в развитии технологии «обезвоживания» древесины сыграло открытие Селюгина Н.С. о возможности сушки и нагрева древесины с помощью электромагнитных полей, создающие в рабочем теле токи высокой частоты [75].

Работы в области СВЧ нагрева диэлектриков в России ведутся уже более 60 лет. Модели СВЧ нагрева изучают многие коллективы ученых, как в нашей стране, так и за рубежом. Существенный объем задач по этой проблеме охвачен в работах Макарова В.Н. [76], Афанасьева А.А., Грудинской Г.П. [77], Тахаув А.А. [22], Афиногентов В.И. [78].

В настоящий момент продолжают исследования в области применения СВЧ энергии. Общее количество публикация настолько велико, что представляется невозможность дать их полный обзор.

Результаты исследований по СВЧ нагреву представлены в работах Архангельски Ю.С. [79], Каданер Я.Д. [80], Некрутман С.В. [81], Рудаков В.И. [82], Морозов Г.А [83]. Колпаков Н.Д. [84], Лукьяненко Н.Е. [84] и др.

Результаты исследований по СВЧ сушке Явчуновский В.Я. [85], Колпаков Н.Д. [86], Кириллов П.К. [87], Брандт Э.А. [88], Торговников Г.И. [89], Параскова П.А. [90] и др.

Анализ данных работ показывает, что отсутствует решение огромного количества практических и теоретических вопросов для процесса нагрева диэлектриков в СВЧ камерах.

Обобщая всё вышеперечисленное, можно с уверенностью сказать, что на настоящее время изучение совместно-протекающих процессов тепломассопереноса при сушке влажных дисперсных и пористых материалов является актуальной задачей, так как решена до настоящего времени.

### 1.3 Актуальность и инновации

В настоящее время теоретическое исследование процессов теплообмена базируется на численном моделировании с использованием электронно-вычислительной машины (ЭВМ) [91]. Это стало возможно благодаря техническому прогрессу в области вычислительной микропроцессорной техники, а так же благодаря развитию вычислительных методов решения задач математической физики [92].

Математическое моделирование процессов теплообмена приобретает значительную роль. Для современной техники и науки необходим точный прогноз таких процессов тепломассопереноса, натурные исследования которых очень дороги и сложны, а иногда и просто невозможны. Моделирование позволяет исключить сложные и дорогостоящие эксперименты для исследования процесса сушки древесины [93]. Экспериментальное изучение процесса «обезвоживания» затруднительно, так как существует большое количество видов деревьев (клён, осина, дуб, берёза, тик, сосна, ясень, кемпас, тик, бук, вишня, граб, ироко, падук, венге и т.п.) [94] с различными характеристиками (линейные размеры, влажность, начальная температура, вид сруба и т.д.). Например, по степени влажности различают:

- «мокрая» заготовка ( $W > 100\%$ ), которая долго находилась в воде;
- свежесрубленная ( $W = 50\div 100\%$ ), сохранившая влагосодержание растущего дерева;
- воздушно-сухой образец ( $W = 15\div 20\%$ ), лежавший на открытом воздухе;
- комнатно-сухой образец ( $W = 8\div 12\%$ ), находившейся в отапливаемом помещении;
- абсолютно сухая ( $W = 0\%$ ), обезвоженная древесина [95].

Системы управления процессом обезвоживания в большинстве сушильных камер основываются на приближенных эмпирически

определенных графиках процесса сушки. Они учитывают только параметры сушильного агента без учета влажности и температуры материала в течение всего процесса удаления влаги и не позволяют решить проблему снижения энергетических затрат. Справочные и нормативные документы регламентируют применение ступенчатых режимов обезвоживания, что позволяет лишь косвенно учесть изменение его теплофизических свойств и влажностное состояние бруска [8].

Ранее время полной сушки древесины определяли по номограммам, построенным на основе экспериментальных результатов. В них не учитывалось распределение температур по толщине образца, движение фронта испарения и изменение теплофизических характеристик в результате изменения агрегатного состояния. Последнее является существенно упрощающим физическим допущением. Следовательно, можно сказать что, расчет времен сушки с использованием таких методов (при помощи номограмм) может привести к достаточно большим ошибкам определения времен полного «обезвоживания» древесины.

Ниже приведен пример такого расчета из учебного пособия И.В. Кречетова «Сушка древесины.- 3-е изд. Прераб. – М.: Лесн. Пром-сть, 1980. – 432 с.»:

*Пример:*

*Температура доски до нагревания 10°С, после нагревания в середине 70° С, температура газообразной среды 80° С, толщина доски 60мм, или R =0,03 м, теплопроводность древесины  $\lambda=0,21$  Вт/(м2°С), коэффициент теплообмена  $a=7$ Вт/(м2°С), коэффициент температуропроводности  $\alpha=0,0005$  м2/ч. Определить продолжительность нагревания доски.*

*Безразмерная температура равна:*

$$\Theta = (t_{cp}-t)/(t_{cp}-t_0) = (80-70)/(80-70) = 0,14$$

*Критерий Био:*

$$Bi = \alpha R / \lambda = 7 * 0,03 / 0,21 = 1$$

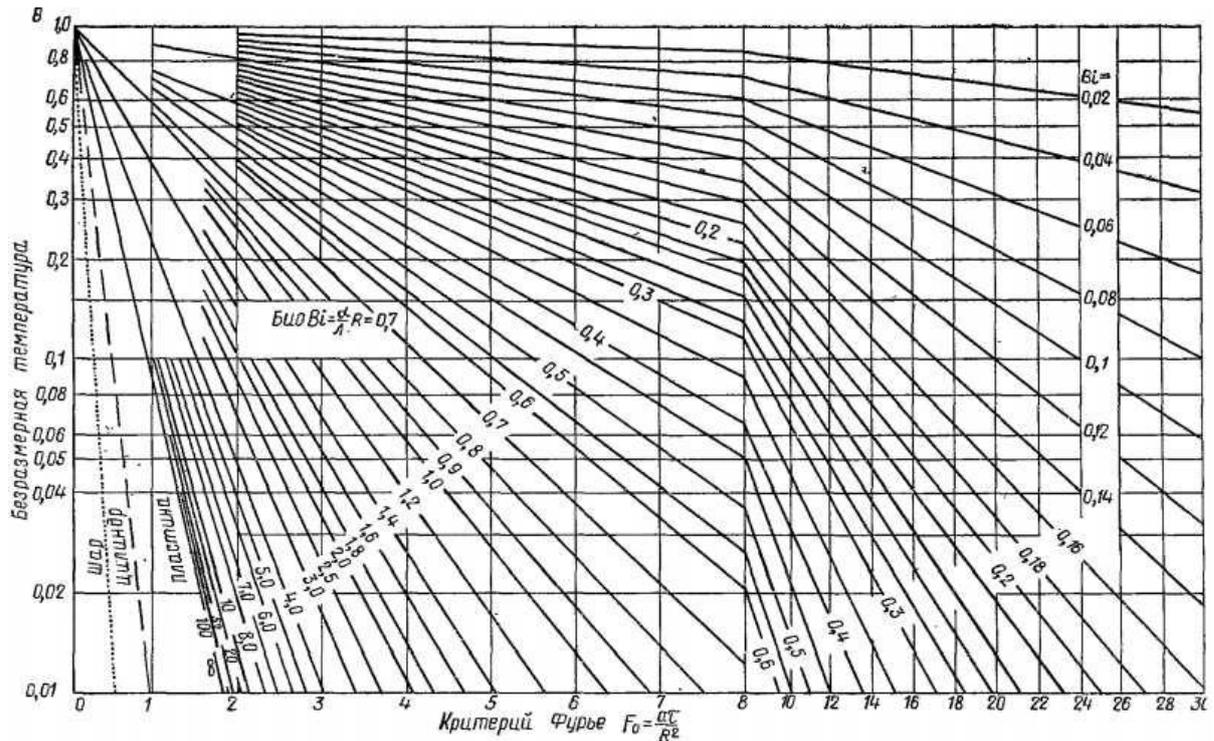


Рисунок -3 Выкопировка из пособия [8]. Графическая зависимость  $Fo(\theta, Bi)$  для неограниченной пластины.

На оси ординат найдем  $\theta=0,14$  и, перемещаясь по горизонтали до наклонной линии  $Bi=1$ , отсчитаем внизу  $Fo=2,8$ . Следовательно, продолжительность нагревания доски:

$$\tau = FoR^2/a = (2,8 * 0,03^2) / 0,0005 = 5 \text{ ч.}$$

Выше приведенный пример доказывает, что классические методы расчета времени полной сушки древесины основываются на существенно упрощающих допущениях, не учитывающие: изменение теплофизических характеристик (плотность, теплоемкость, теплопроводность), распределение температуры внутри заготовки, пористость (сухого слоя) и движение водяных паров по слою образца. По этой причине математическое моделирование процессов сушки пористых материалов является наиболее оптимальным методом для расчета времени полной сушки древесины, учитывающий внешние условия и характеристики заготовки.

Численное моделирование с глубокой детализацией процесса удаления влаги из пиломатериалов при разных начальных параметрах (интенсивность

теплообмена и температура сушильного агента) и при различных характеристиках самой заготовки (порода и вид древесины, линейные размеры, начальная влажность и температура, продольный или поперечный срез) позволяют проводить с высокой степенью точности, расчеты времен процесса удаления влаги из древесины.

## 2. Постановка задачи

### 2.1 Физическая постановка задачи

На Рисунке 4 приведена принципиальная схема сушильной установки для конвективно-микроволновой сушки древесного образца. Предполагалось, что имеется образец древесины, загружаемый в сушильную камеру, в которую подаётся воздух, нагретый продуктами сгорания, и имеется источник СВЧ-излучения.

В начальный момент времени ( $\tau=0$ ) образец древесины попадает в сушильную камеру, и нагревается за счет комбинированного воздействия конвекции и микроволнового излучения. Вследствие нагрева инициируется процесс испарения воды.

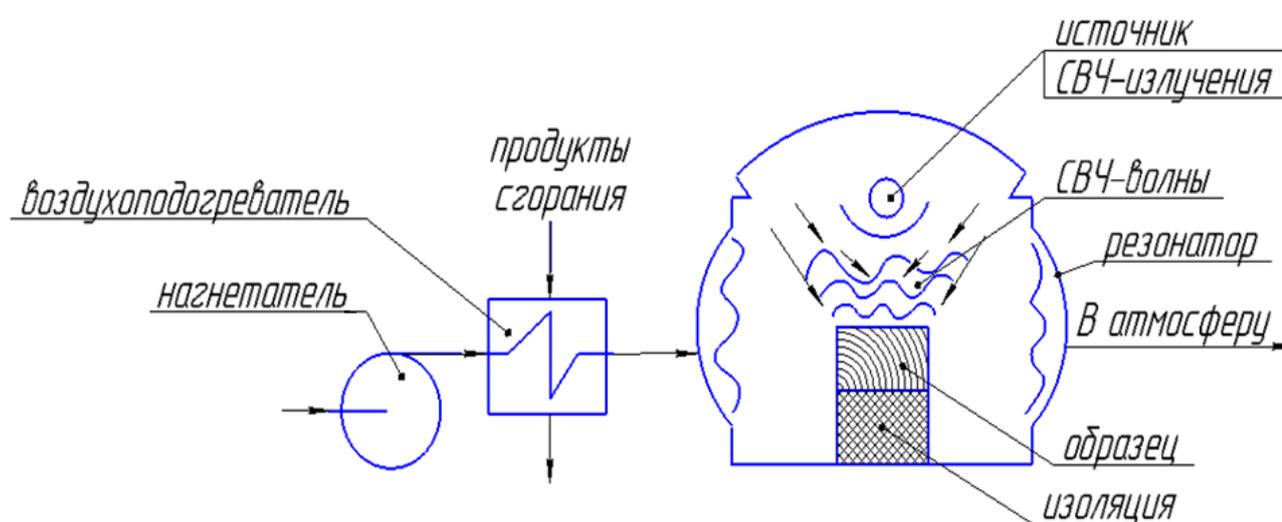
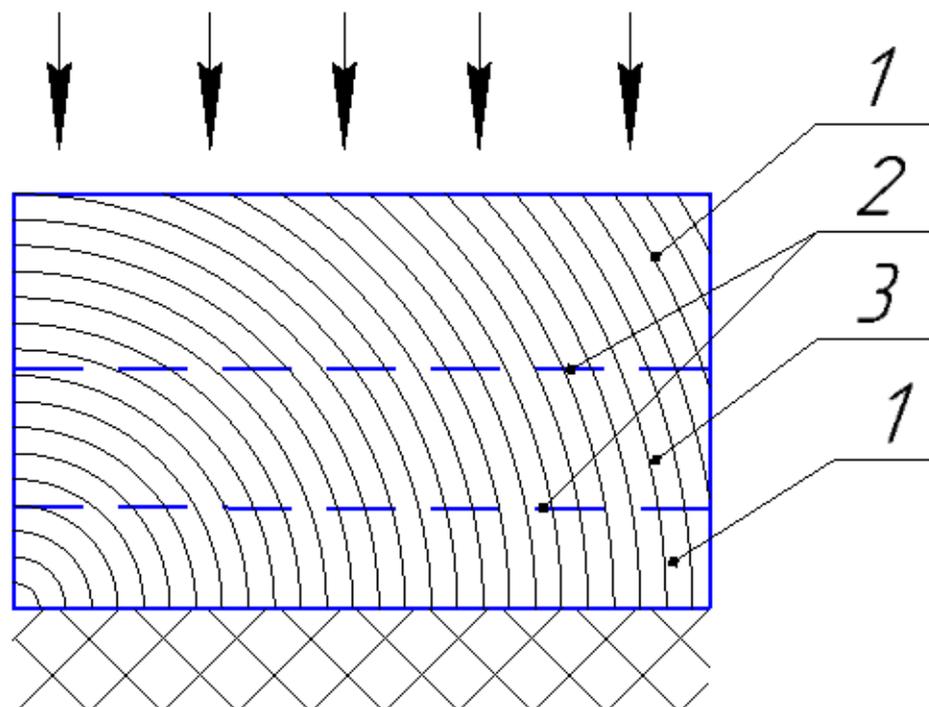


Рисунок – 4 Принципиальная схема сушильной установки для конвективно-микроволновой сушки древесины.

Фронт испарения (рисунок 5) движется от поверхности вглубь образца. В результате формируется слой сухой древесины с низким коэффициентом теплопроводности. Период времени от начала теплового воздействия до момента полого высыхания (прохода фронта испарения по всему образцу), считается временем сушки.

## *Конвекция и СВЧ-воздействие*



*Рисунок – 5. Схема области решения задачи.*

*1-«обезвоженная» древесина, 2-фронт испарения, 3-влажная древесина.*

Процесс влагоудаления рассматривается в рамках фронтальной модели испарения воды. Стоит заметить, что процессы фазовых превращений («сухая древесина»- «влажная древесины») являются одними из самых трудных задач математической физики. В основном, это касается процессов испарения. Последнее заключается в том, что испарение воды происходит в очень узкой (во много раз меньше линейного размера заготовки) постоянно перемещающейся зоны (фронта испарения). Стоит отметить, что испарение влаги происходит с достаточно высоким эндотермическим эффектом (до  $2,5 \cdot 10^3$  кДж/кг). Также необходимо заметить, что в процессе удаления влаги из древесины формируется пористый древесный слой с низким коэффициентом теплопроводности. Последний существенно затягивает процесс «обезвоживания».

В результате СВЧ-воздействия возникает внутреннее тепловыделение, возможно формирование сухого слоя внутри образца. В таком случае, возникает второй фронт испарения, который движется из глубины заготовки к поверхности. Такой процесс относится к многофронтным задачам Стефана.

По выше перечисленным причинам проведение процедуры численного моделирования процесса сушки древесины, необходимо применять различные методы релаксации теплового потока на границе раздела фаз «сухая древесина - влажная древесина», например, одним из таких методов неявного выделения фронта испарения.

## 2.2 Математическая постановка

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

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

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right) - \frac{Q_{isp}W_{isp}}{h_d} + \varepsilon f t g \delta |E|^2 \quad (1)$$

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

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

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

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

Поставленная задача математической физики решалась методом конечных разностей [93, 96, 97].

Задача «обезвоживания» решалась методом неявного выделения фронта испарения [98].

Система уравнений 1-3 решалась при исходных данных приведенных в таблице 2.

Таблица 2.

	Ср, Дж/(кгК)	$\lambda$ , Вт/(мК)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Дерево- дуб	1200	0,16	500
воздух	4187	0,034	1
вода	1000	0,6	1000

## 2.3 Тестовые задачи

С целью верификации математической модели были решены несколько тестовых задач.

### *Решение одномерного уравнения теплопроводности*

Рассматривается процесс теплопереноса через бесконечную плоскую пластину с конечной толщиной. На правой границе пластины поддерживается температура -  $T_n$ , на левой температура -  $T_l$ , а начальная температура в пластине -  $T_0$ . Внутренним источником тепловыделения пренебрегаем.

Процесс тепломассопереноса описывается одномерным уравнением теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 < x < L. \quad (1)$$

Краевые условия и замыкающие соотношения следующие:

$$t = 0: T = T_0, \quad 0 \leq x \leq L; \quad (2)$$

$$x = 0: T = T_l, \quad t > 0; \quad (3)$$

$$x = L: T = T_n, \quad t > 0.$$

Заданы следующие параметры плоской пластины: материал сталь ( $\rho=7900 \text{ кг/м}^3$ ,  $\lambda = 45 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ ,  $c=450 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$ ),  $L = 0.1 \text{ м}$ ,  $T_0 = 20 \text{ °C}$ ,  $T_n = 100 \text{ °C}$ ,  $T_l = 100 \text{ °C}$ .

Время нагрева -  $t = 60 \text{ с}$ .

Результаты математического моделирования приведены на рисунке 6.

Проанализировав зависимости на рисунке 6, полученные в результате численного решения системы (1) - (3) и аналогичные кривые, приведенные в пособии [93], можно отметить, что полученные распределения температур идентичны.

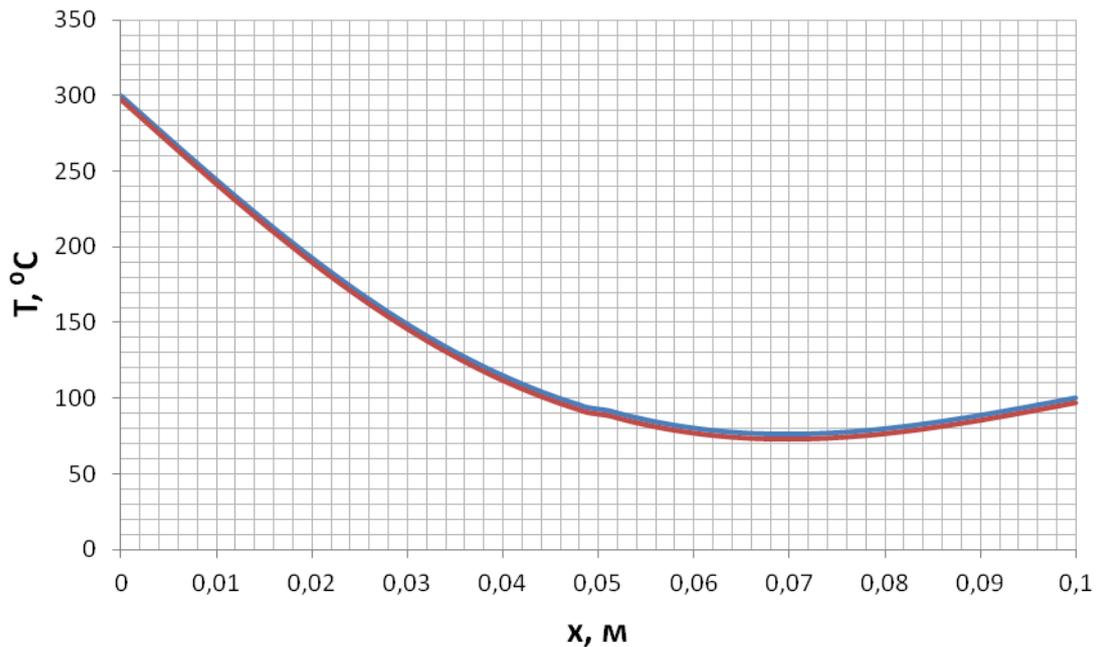


Рисунок- 6. Распределение температуры по толщине пластины в момент времени  $t = 60$  с

*Решение задачи теплопроводности с внутренними источниками*

Неограниченная пластина с толщиной  $L=0.3$ , в которой точно размещен источник тепловыделения с мощностью  $Q(x)$ . Внутренние источники находятся в точках  $x \in A = \left\{ \frac{L}{4}, \frac{L}{2}, \frac{3 \cdot L}{4} \right\}$ .

$$\text{Функция } Q(x) = \begin{cases} \frac{L}{4} \cdot q \text{ Вт/м}^3, & x = \frac{L}{4}; \\ \frac{L}{2} \cdot q \text{ Вт/м}^3, & x = \frac{L}{2}; \\ \frac{L}{4} \cdot q \text{ Вт/м}^3, & x = \frac{3 \cdot L}{4}; \\ 0 \text{ Вт/м}^3, & x \notin A; \end{cases} \text{ где } q = 10^5 \text{ Вт/м}^4.$$

Даны следующие параметры: материал пластины ( $\rho=10500$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda = 419$  Вт/(м·°C),  $c=200$  Дж/(кг·°C)). Начальная температура  $T_0=15^\circ\text{C}$ . На границах происходит теплообмен с окружающей средой (температура окружающей среды  $T^e=60$  °C, коэффициент теплообмена  $k=50$  Вт/(м·°C)). Определим температурные поля через 1 с, 5с и 10 с.

Распределение температур в пластине описывается уравнением энергии:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q(x), \quad 0 < x < L. \quad (1)$$

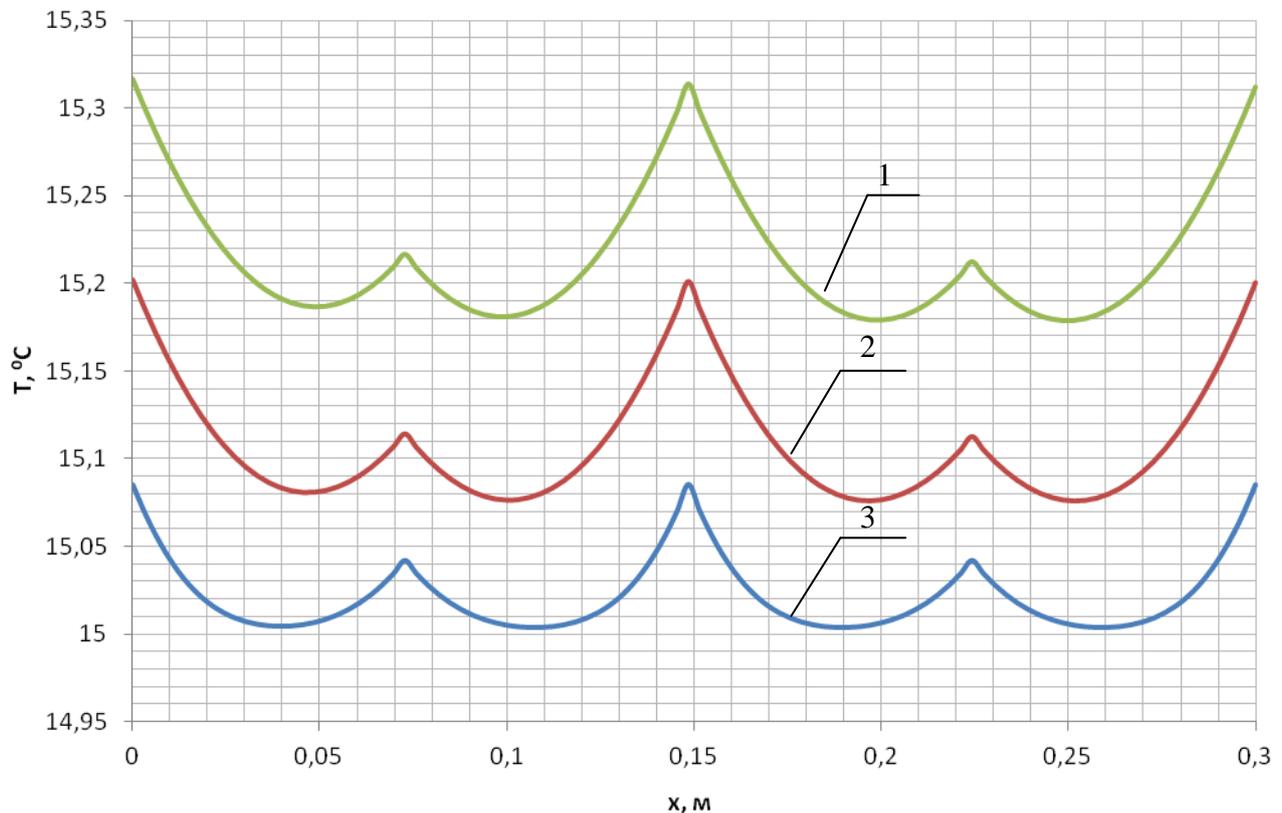
Граничные и начальные условия будут иметь вид:

$$t=0: T=T_0, \quad 0 \leq x \leq L; \quad (2)$$

$$x=0: -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = k(T^e - T), \quad t > 0;$$

$$x=L: +\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = k(T^e - T), \quad t > 0; \quad (3)$$

Полученные результаты распределения температур приведены на рисунке 7.



*Рисунок - 7. Распределение температуры по толщине в разные моменты времени 1 – 10 с, 2 – 5 с, 3 – 1 с.*

Если проанализировать кривые на рисунке 7, полученные в результате численного решения системы (1) - (3) и аналогичные зависимости, приведенные в [93], то можно отметить, что полученные распределения температур идентичны.

*Решение одномерного уравнения теплопроводности с подвижной границей  
(промерзание влажного грунта)*

Влажный грунт прибывает в талом состоянии с исходной температурой  $T_0$ . На поверхности грунта в начальный момент времени ( $\tau=0$ ) моментально устанавливается температура -  $T_c$ , которая снижается до температуры промерзания -  $T_3$ . В результате, формируется промерзший слой с переменной толщиной  $\xi = f(t)$ . Нижняя граница промерзшего слоя с температурой замерзания  $T_3$ . На данной границе происходит фазовый переход и, в результате, выделение теплоты  $Q_f$ . Соответственно, нижняя граница имеет температуру грунта на глубине, а верхняя граница – постоянную температуру замерзания.

Уравнение энергии в поставленной задаче:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \alpha_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, & 0 < x < \xi(t), t > 0; \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} = \alpha_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, & \xi(t) < x < L, t > 0; \end{cases} \quad (1)$$

Поставленная задача математической физики решалась с помощью следующих граничных условий и замыкающих соотношений:

$$t = 0: T(x) = T_0, 0 \leq x \leq L; \quad (2)$$

$$x = 0: T(t) = T_c, t > 0; \quad (3)$$

$$x = L: \frac{\partial T}{\partial x} = 0, t > 0.$$

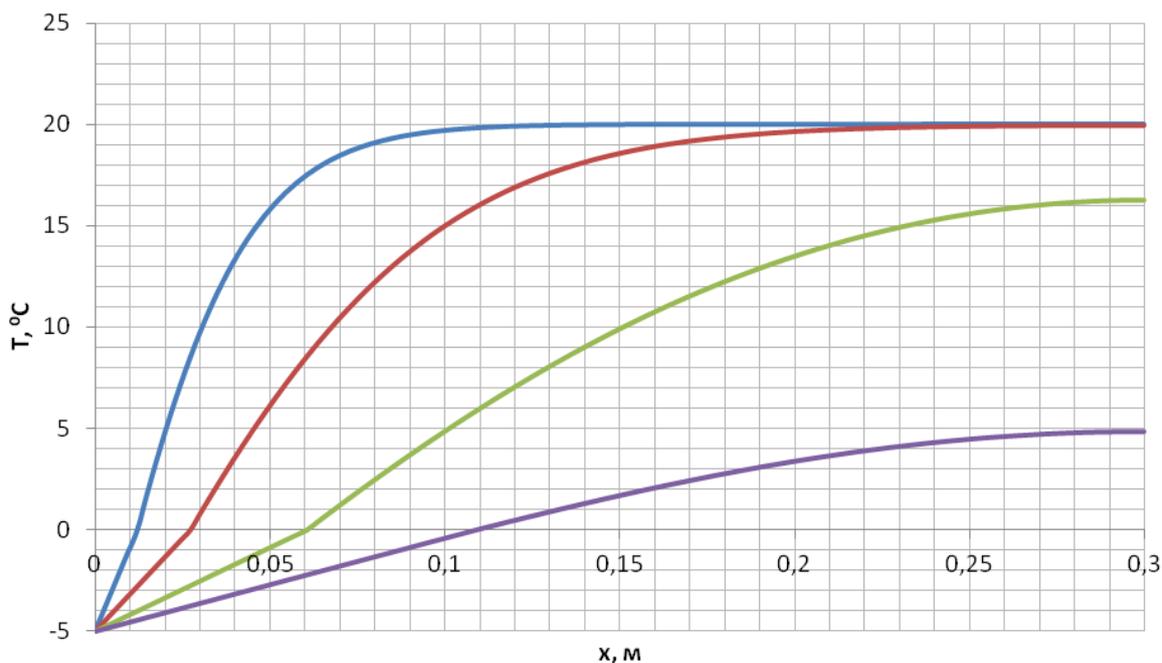
На границе раздела системы «влажный грунт - промерзший грунт» выполняются граничные условия 4-го рода:

$$x = \xi(t): \begin{cases} T_1 = T_2 = T_3 \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = Q_f \rho \omega \frac{d\xi}{dt}; \end{cases}$$

Исходные данные: глубина грунта  $L = 0.3$ , теплофизические характеристики промерзшей ( $\rho=917$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda = 2.3$  Вт/(м·К),  $c=2090$  Дж/(кг·К)) и талой ( $\rho=1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda = 0.6$  Вт/(м·К),  $c=4220$  Дж/(кг·К)) зоны

грунта, начальная температура  $T_0=293$  К, температура замерзания  $T_3=273$  К, температура на поверхности грунта  $T_c=268$  К, влажность грунта  $\omega = 1$  кг/кг, теплота фазового перехода  $Q_\phi=3.32 \cdot 10^5$  Дж/кг.

Полученные результаты распределения температур приведены на рисунке 8.



*Рисунок- 8. Распределение температуры по глубине грунта*

Если проанализировать кривые на рисунке 8, полученные в результате численного решения системы (1) - (3) и аналогичные зависимости, приведенные в [93], то можно отметить, что полученные поля температур идентичны.

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5Б2Б	Косторева Жанна Андреевна

<b>Институт</b>	<b>Энергетический</b>	<b>Кафедра</b>	<b>теоретической и промышленной теплотехники</b>
<b>Уровень образования</b>	бакалавриат	<b>Направление</b>	13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость материальных ресурсов, амортизационные отчисления, заработная плата научного руководителя.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Нормы амортизации, нормы премии по счету заработной платы.</i>
3. <i>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:**

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Экспертная оценка языков программирования</i>
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Составление бюджета НИР</i>
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Анализ критериев ресурсоэффективности</i>

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

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**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>
5Б2Б	Косторева Жанна Андреевна		

## **4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

**Тема:** Математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса в условиях микроволнового нагрева влажной древесины.

### **4.1 Хозяйственные цели проекта**

1) Численное моделирование с глубокой детализацией процесса испарения влаги из древесины при разных начальных параметрах окружающей среды (температура сушильного агента и интенсивность теплообмена (коэффициент теплоотдачи)) и при различных характеристиках древесной заготовки (толщина, вид и порода древесины, начальная температура и влажность, срез поперек или вдоль волокон) позволяет производить расчеты временных характеристик процесса «обезвоживания» для древесинных заготовок;

2) Получение распределения поля температуры по всей толщине заготовки в момент полного высыхания, следовательно, определение температуры в каждой точке образца;

### **4.2 Преимущества моделирования по сравнению с экспериментальным исследованием**

1) Численное моделирование позволяет исключить множество дорогостоящих и сложных экспериментов для исследования процесса «обезвоживания» пиломатериалов. Экспериментальное изучение процесса сушки затруднительно, так как существует огромное количество видов деревьев (дуб, осина, ель, берёза, пихта, ясень, вишня в том числе и тропические виды) с различными характеристиками (толщина, начальная влажность, начальная температура, вид сруба и т.д.);

2) Ранее время влагоудаления из древесины определяли по номограммам, построенным на основе экспериментов на устаревшем

оборудовании. В номограммах допущены существенные упрощения и допущения, не учитывающие: изменение теплофизических характеристик (плотность, теплоемкость, теплопроводность), распределение температуры внутри заготовки, пористость (сухого слоя) и движение водяных паров по слою образца. По этой причине математическое моделирование процессов сушки пористых материалов является наиболее оптимальным методом для расчета времени полной сушки древесины, учитывающий внешние условия и характеристики заготовки.

### 4.3 Календарный план-график выполнения НИР

Календарный план НИР устанавливает очередность выполнения работ в увязке со временем их исполнения. Сроки исполнения зависят от сложности операций на каждом из этапов, что отображено в таблице 3.

Таблица 3 – Календарный план выполнения НИР

Код работы	Наименование работы	$t_{\min i}$ , день	$t_{\max i}$ , день	У, человек	$t_{ож\ i}$ , день
а	Составление и утверждение технического задания	1	1	1	1
б	Оформление технического задания	1	1	1	1
в	Подбор теоретической информации	4	8	1	5
г	Разработка программного обеспечения	3	4	1	5
д	Математическое моделирование	3	5	1	3
е	Проведение вычислений	4	5	1	3
ж	Анализ результатов	3	5	1	4
	Разработка экономической части				
з	Хозяйственные цели проекта	1	1	1	1
и	Экспертная оценка	1	1	1	1
к	Календарный план	1	1	1	1
л	Бюджетный план	1	1	1	1
	Расчет БЖД				
м	Обеспечение пожарной безопасности	1	1	1	1
н	Обеспечение микроклимата рабочего места	1	1	1	1
о	Оформление	3	4	1	3

Представим графически календарный план выполнения НИР. Для этого построим диаграмму Ганта.(рисунок 28,29)

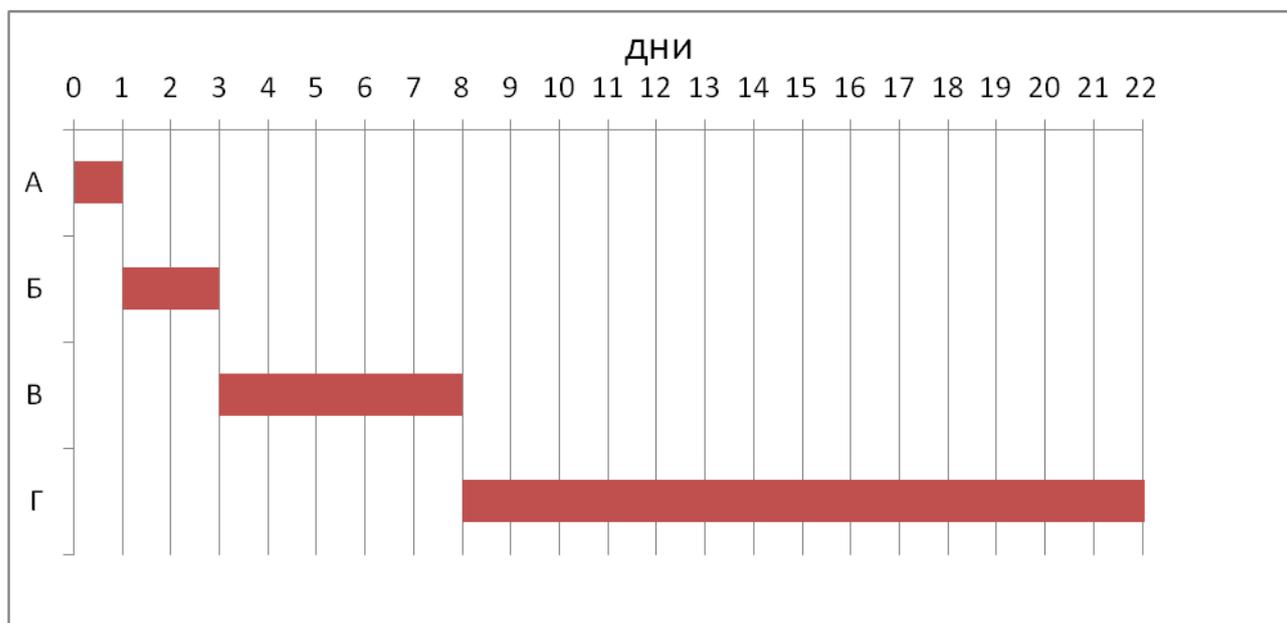


Рисунок -28.

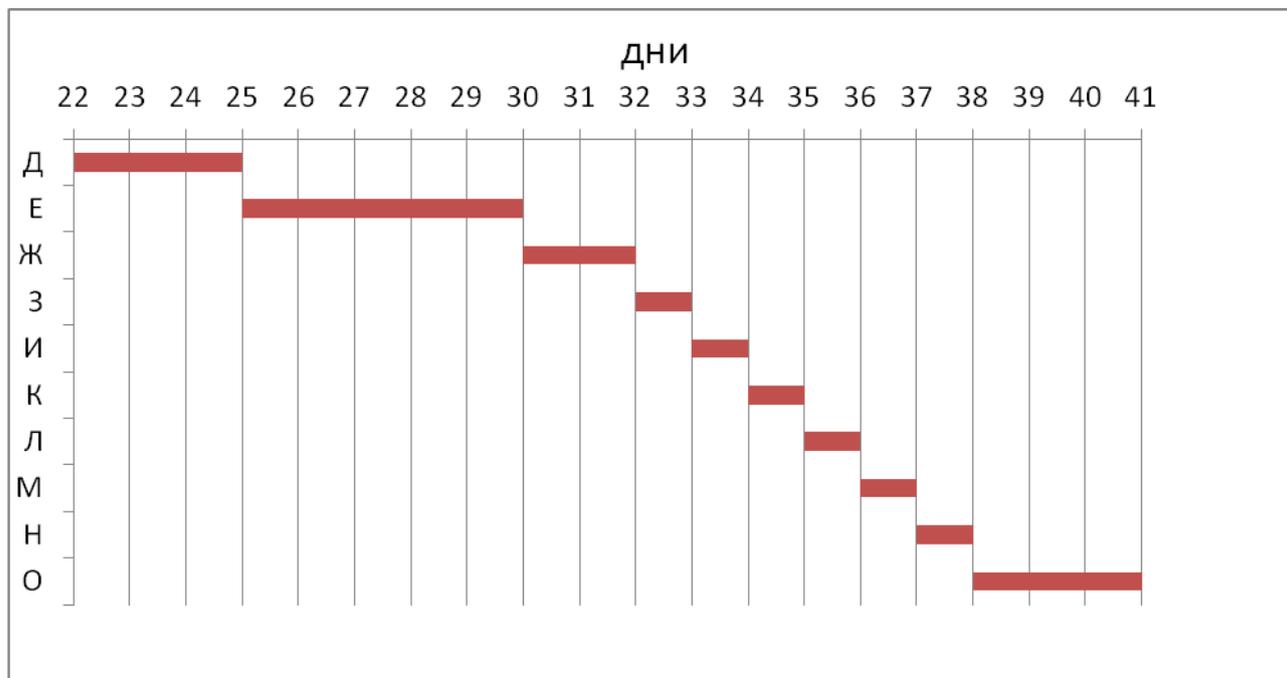


Рисунок - 29.

#### 4.4 Экспертная оценка

Таблица 4 – Оценка экспертом №1

Фирма производитель	Качество	Гарантия	Технические характеристики	Обслуживание	Сумма
<u>Pascal</u>	8/2,16	8/1,04	8/2,64	9/2,43	8,27
<u>C++</u>	7/1,89	5/0,65	8/2,64	4/1,08	6,26
<u>Фортран</u>	5/1,35	3/0,39	4/1,32	3/0,81	3,87
<u>Delphi</u>	9/2,43	9/1,17	9/2,97	8/1,92	8,49
Важность (bi) [1-5]	4	2	5	4	15
Вес (Wi)	0,27	0,13	0,33	0,27	1

Таблица 5 – Оценка экспертом №2

Фирма производитель	Качество	Гарантия	Технические характеристики	Обслуживание	Сумма
<u>Pascal</u>	10/2,1	8/2,32	8/2,32	10/2,1	8,84
<u>C++</u>	6/1,26	4/1,16	9/2,61	3/0,63	5,66
<u>Фортран</u>	6/1,26	4/1,16	5/1,45	4/0,84	4,71
<u>Delphi</u>	10/2,1	7/2,03	9/2,61	9/1,89	8,63
Важность (bi) [1-5]	3	4	4	3	14
Вес (Wi)	0,21	0,29	0,29	0,21	1

Таблица 6 – Оценка экспертом №3

Фирма производитель	Качество	Гарантия	Технические характеристики	Обслуживание	Сумма
Pascal	8/2,24	9/1,44	8/2,24	9/2,52	8,44
C++	8/2,24	5/0,8	7/1,96	4/1,12	6,12
Фортран	5/1,4	4/0,64	3/0,84	5/1,4	4,28
Delphi	9/2,52	8/1,28	7/1,96	9/2,52	8,28
Важность (b <sub>i</sub> ) [1-5]	5	3	5	5	18
Вес (W <sub>i</sub> )	0,28	0,16	0,28	0,28	1

Таблица 7 – Оценка экспертом №4

Фирма производитель	Качество	Гарантия	Технические характеристики	Обслуживание	Сумма
<u>Pascal</u>	9/3,24	10/2,1	7/0,98	8/2,32	8,64
<u>C++</u>	5/1,8	7/1,47	5/1,47	3/0,87	5,61
<u>Фортран</u>	10/3,6	6/1,26	6/0,84	10/2,9	8,6
<u>Delphi</u>	4/1,44	8/1,68	3/0,42	9/2,61	6,15
Важность (b <sub>i</sub> ) [1-5]	5	3	2	4	14
Вес (W <sub>i</sub> )	0,36	0,21	0,14	0,29	1

Таблица 8 – итог экспертной оценки

Фирма производитель	Эксперт №1	Эксперт №2	Эксперт №3	Эксперт №4	Средняя оценка
<b>Pascal</b>	<b>8,27</b>	<b>8,84</b>	<b>8,44</b>	<b>8,64</b>	<b>34,19</b>
C++	6,26	5,66	6,12	5,61	23,65
Фортран	3,87	4,71	4,28	8,6	21,46
Delphi	8,49	8,63	8,28	6,15	31,55

#### 4.5 Бюджетный план

Исходя из стоимости на используемые в работе материалы, а также затрат на электроэнергию составляется бюджетный план проекта. Затраты на электроэнергию рассчитываются по нормам электропотребления приборов и длительности использования за период выполнения НИР.

Таблица 9 – Расходы на материалы для выполнения НИР

Расходы	Ед. измерения	Цена	Кол-во	Итого
Канцтовары	-	-	-	525
Заправка картриджа	шт	750	1	750
Электроэнергия	кВт·ч	4,25	50	212,5
<b>Итого:</b>				<b>1 487,5</b>

Таблица 10 – Стоимость канцтоваров для выполнения НИР

Наименование:	Цена
Бумага	200
Ручка	25
Флешка	300
<b>Итого:</b>	<b>525</b>

Таблица 11 – Потребление электроэнергии при выполнении НИР

Источник потребления	Мощность, кВт/ч	Кол-во часов	Итого:
Персональный компьютер	0,2	230	46
Ноутбук	0,06	20	1,2
Освещение	0,05	54	2,7
Принтер	0,05	2	0,1
<b>Итого:</b>			<b>50</b>

В связи с изнашиванием оборудования в процессе выполнения работы стоит учитывать затраты на его амортизацию. Расчёт производится по следующим соотношениям:

Норма амортизации =  $(1/\text{срок службы}) * 100$ ;

Величина амортизации в год =  $(\text{стоимость оборудования} * \text{норма амортизации}) / 100$ ;

Сумма амортизации в час =  $\text{величина амортизации в год} / \text{количество часов работы в год}$ ;

Стоимость амортизации =  $\text{время работы} * \text{сумма амортизации в час}$ .

Данные об амортизационных отчислениях сведены в таблицу 12.

Таблица 12 – Затраты на амортизацию оборудования

Объект	Норма в год	Стоимость	Величина в год	Кол-во часов	Сумма в час	Время работы, ч.	Стоимость амортизации
Персональный компьютер	20	50000	10000	1720	5,81	200	1162
Принтер	20	8000	1600	382	4,18	2	8,36
Ноутбук	20	30000	6000	2290	2,62	20	52,4
<b>Итого:</b>							<b>1222,76</b>