

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
Математическое моделирование процессов теплопереноса при радиационно-конвективной сушке древесины.

УДК 621.1.016.4: 674.047:536.25

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б2Б	Косторева Анастасия Андреевна		

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
5Б2Б	Косторева Анастасия Андреевна

Тема работы:

**Математическое моделирование процессов
теплопереноса
при радиационно-конвективной сушке древесины.**

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.

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

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <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 и научных публикаций по направлению исследования процессов тепломассопереноса при сушке древесины. Физическая постановка. Формулирование математической модели на основе физической постановки. Верификация программы Проведение численного моделирования. Заключение.</p>
<p>Перечень графического материала</p>	<p>20 слайдов</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Попова Светлана Николаевна, доцент каф. МЕН</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Дашковский Анатолий Григорьевич, доцент каф. ЭБЖ</p>

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

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 Анастасия 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 83 с., 27 рис, табл. 14, 69 источников, приложения отсутствуют.

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

Объектом исследования: влажная древесная заготовка;

Цель работы – математическое моделирование процессов тепло- в массопереноса протекающих совместно при сушке древесины в условиях комбинированного радиационно-конвективного нагрева;

В результате численного моделирования были получены зависимости времён полной сушки древесины от температуры сушильного агента при различных начальных параметрах и характеристиках древесины;

Степень внедрения: результаты внедрены в учебный процесс;

Область применения: конвективные сушильные установки.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1. Обзор литературы	7
1.1 Актуальность тематики	
1.2 Разработанные методы расчета процесса сушки влажной древесины дисперсных и пористых материалов	17
1.3 Процесс тепло- и влагопереноса в процессах сушки	19
1.4 Теория и практика радиационно-конвективной сушки	20
2. Актуальность и инновации	23
3. Постановка задачи	26
3.1 Физическая постановка задачи	
3.2 Математическая постановка задачи	28
3.3 Тестовые задачи	29
4. Результаты и обсуждения математического моделирования	36
4.1 Влияние размеров влажной заготовки на время полной сушки	
4.2 Влияние влажности на время полной сушки	38
4.3 Влияние коэффициента теплоотдачи на время полной сушки	45
4.4 Влияние степени черноты на время полной сушки	46
4.5 Распределение температур по толщине древесины	47
4.6 Влияние вида древесины на время полной сушки	49
4.7 Влияние вида сруба на время полной сушки	54
5. Финансовый менеджмент	58
6. Социальная ответственность	68
7. Заключение	77
8. Список литературы	78

ВВЕДЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе приведены результаты численного решения задачи сушки влажной древесины. Проведены численные эксперименты по определению времен сушки в зависимости от различных параметров теплообмена (температура окружающей среды и интенсивность теплообмена) и характеристик заготовки (линейные размеры, вид и порода древесины, начальная влажность и температура, зависимость теплопроводности от расположения волокон). По результатам численного решения было установлено, что при увеличении температуры сушильного агента скорость сушки значительно увеличивается, при этом увеличение коэффициент теплообмена не оказывает существенного влияния.

Также в результате математического моделирования были определены распределения температур внутри образца в момент полного «обезвоживания» древесины. Проанализировав можно сделать вывод о том, что существуют режимы сушки, при которых возможны существенные перегревы приповерхностного слоя. Последнее может привести к термическому разложению древесины, нарушению прочностных характеристик заготовки, а также увеличивается риск подгорания поверхности заготовки.

1. Обзор литературы

1.1 Актуальность тематики

Потенциал предприятия лесопромышленного комплекса (ЛПК) Российской Федерации постоянно растет. Россия располагает 20,6 % всех площадей леса. В структуре промышленного производства РФ по объему выпускаемой продукции в 2012 году лесопромышленное производство занимало восьмое место [1-3]. Последнее свидетельствует о снижении объема ЛПК [4] в структуре торговли в России. Это наносит большой экономике страны. Поэтому следует уделять большое внимание развитию ЛПК, а именно способствовать повышению конкурентоспособности Российской лесной промышленности и смежных производств на внутреннем и на внешнем рынках [5]. Успех интеграции с внешним рынком и увеличение удельного веса экспортной продукции лесопромышленного комплекса предполагает решение внутриотраслевых задач. Первоочередные проблемы лесозаготовительного, деревообрабатывающего производства и целлюлозно-бумажной промышленности связаны с увеличением прибыльности и рентабельности производств [6]. Уменьшение предельных издержек заключается в расширении масштабов производства продукции с высокой добавленной стоимостью. Но на настоящее время низкий финансово-экономический потенциал и высокие отраслевые риски снижают инвестиционную привлекательность ЛПК для создания конкурентоспособных производств. Только внедрение прогрессивных и инновационных технологий, расширение производственных мощностей по выпуску высококачественной продукции позволит России занять ведущие место на мировом рынке среди лесобумажных производителей [7].

В последнее время в России продолжается экстенсивный и интенсивный рост предприятий, занимающихся изготовлением мебели и строительных материалов, которым необходимы заготовки различных пород древесины (ель, пихта, берёза, дуб и др.) [8]. Одним из технологических этапов подготовки древесины является удаление влаги из пиломатериалов перед

запуском их в производство, затраты на «обезвоживание» составляют до 30% от стоимости сухих материалов [9]. Этот этап подготовки один из самых продолжительных и энергоёмких [10]. В тоже время экономика РФ направлена на формирование энергоэффективного производства, о чем свидетельствует указ Президента РФ от 07.06.2011 № 899, согласно которому в число основных направлений развития науки, технологий и техники в России включено рациональное природопользование [11-12]. Повышение цен на энергоносители создает предпосылки развития и внедрения в производство энергосберегающих технологий. Особенно это касается пищевой, химической и деревообрабатывающей промышленности [13]. Объём высушенных материалов в России достаточно велик: в 2000 г. он составил около 12,8 млн. м³ при неудовлетворительном спросе на сухую продукцию, составляющую 25-30% [14], поэтому сокращение продолжительности сушки и снижение энергозатратности при сохранении качества обезвоженной продукции всегда были актуальными направлениями в научных исследованиях, для рационального использования древесных ресурсов. [15]

Древесина, которая содержит много воды - быстро загнивает, в результате поражения грибковыми заболеваниями [16]. В то время как, сухая имеет высокую стойкость к биологическому разложению. Понижение влажности в бруске увеличивает ее прочность, уменьшает массу и улучшает склеиваемость. Влажная древесина является питательной средой для грибов и насекомых. Ущерб от насекомых не значителен, что нельзя сказать о вреде наносимом – грибами. Брусок начинает активно гнить при температуре – от 0 до 50°С и влажности воздуха – 80-100 %, при условии наличия доступа кислорода, влажность дерева – более 15 %. В результате гниения физико-механические характеристики материала значительно меняются [17]. Поэтому влагу начинают удалять из древесины сразу же после лесопиления перед деревообработкой [18]. Это делается для обеспечения надежного хранения и транспортировки лесозаготовки [19].

Влажность, до которой сушат древесину, зависит от дальнейшего применения заготовки. При «обезвоживание» древесины заготовку доводят до необходимого для эксплуатации влагосодержания (d) [20]. Например, d для заготовок дверей и оконных проёмов должна быть в пределах от 3 до 12%, влажность штучного паркета колеблется в пределах от 3 до 9%, а паркетных досок и щитов 2 - 8% [21].

Сушка - является тепловым процессом в ходе, которого происходит удаление влаги из различных материалов путём выпаривания или испарения [22]. Влагу, находящуюся в бруске можно удалять в виде пара, жидкости или льда [23]. По этому признаку все методы удаления влаги подразделяются на три группы:

- 1) термические,
- 2) механические,
- 3) комбинированные [24].

Различные термические методы получили самое большое распространение [25]. В комбинированных способах «обезвоживание» используется как фазовое превращение, так и механическое воздействие [26]. Наиболее эффективным методом удаления влаги является механический метод [27]. В основе последних лежит процесс движения влаги в жидкой фазе под действием массовых сил. Механические методы удаления влаги менее энергозатратные, чем термические способы «обезвоживания». Это обусловлено тем, что влага удаляется в жидком состоянии, соответственно не требуются затраты энергии на испарение, которое забирает более 60% всей подводимой теплоты [28].

Способы механической сушки подразделяются: пневматические, вибрационные, гравитационные, в поле электрокинетических и центробежных сил, комбинированные [29]. Например, при испарении метод центрифугирования материал загружается в сушильный барабан (диаметром до 2400 мм), затем этот барабан раскручивается до установленной правилами технической эксплуатации скорости (угловая скорость 9,1 рад/с). В

результате действие центробежных сил, влага в древесине перемещается к наружной поверхности барабана, через которую она отводится наружу [30]. *Преимущество* такого метода заключается в высокой производительности, так как процесс не продолжительный, отсутствует потребность в больших размерах сушильных камер. Однако стоит отметить, что механические способы удаления слабо применимы для обработки древесины в производстве. Это обусловлено несовершенством известных конструкций сушильных установок. В итоге основным методом удаления влаги является всё таки термическая сушка. [31]

Сушка материалов проходит при одновременном протекании нескольких физических процессов:

- **теплообмен** – передача тепловой энергии от сушильного агента древесине;
- **теплопроводность** - передача тепла внутри образца;
- **фильтрация** – перемещение влаги внутри материала в газообразном или жидком состоянии. [20-21]

Степень влияния вышеперечисленных процессов зависит от способа влагоудаления. Некоторые процессы могут быть основными при одном виде сушки и не оказывать никакого влияния при другом. [21]

Удаление влаги из древесины может осуществляться различными способами:

- **Конвективная сушка** основана на передаче теплоты древесине путем конвекции от жидкой или газообразной среды. Подразделяется:
 - *газопаровая* сушка, осуществляется нагретыми газами в специальных сушильных аппаратах;
 - *атмосферная* сушка без подогрева воздуха - заготовки складываются в штабели и высушиваются под навесами или в неотапливаемых помещениях, так же возможно складирование и на открытом воздухе;

- *жидкостная* сушка, проводится в нагретых гидрофобных жидкостях или в солевых водных растворах;
- *вакуумная* сушка происходит при низких давлениях.
- **Кондуктивная сушка**, проводится при непосредственном взаимодействии высушиваемых материалов с горячими поверхностями.
- **Радиационная сушка** основана на передаче теплоты заготовке при воздействии на последнюю источниками излучения ($\lambda=2000-2300$).
- **Микроволновая**, с применением энергии электромагнитного поля различной частоты [21]

Конвективный нагрев, является основным способом сушки лесоматериалов. Этот метод заключается в циркуляции в сушильной камере подогретого сухого воздуха, как сушильного агента между заготовками. Пиломатериалы укладываются в штабеля и загружаются в сушильную камеру. В камере циркулирует подогретый (до 473 °С) сухой воздух между заготовками. Кроме воздуха в качестве сушильного агента могут использоваться топочные газы или перегретый пар. *Преимущества* такого метода сушки являются простота и низкая себестоимость оборудования. *Недостатки* – это длительность процесса, большой размер сушильных камер, сравнительно низкое качество высушенных пиломатериалов больших сечений, большой расход энергии для подогрева воздуха [27].

Атмосферная сушка применяется для сушки экспортной продукции на заводах с сезонной отгрузкой. Это самый простой способ сушки пиломатериалов. Она производится на открытом воздухе под навесом. Пиломатериалы укладывают на фундаменты с зазорами и закрывают крышей от солнечных лучей и попадания осадков. *Преимущества* этого метода заключается в отсутствие дорогого и сложного оборудования, не требует применения специальных механических устройств и источников тепла. *Недостатками* является продолжительное время сушки, необходимость в

большой территории складов, зависимость от температуры наружного воздуха и атмосферной влажности, большая вероятность повреждения древесины насекомыми, плесенью и грибами, отсутствует возможность регулирования процесса сушки, при этом конечная влажность составляет не менее 22% [24].

Вакуумная сушка проходит при пониженном давлении, что снижает температуру кипения воды. Обезвоживание происходит в специальных герметичных сушильных камерах с предварительной откачкой воздуха (созданием вакуума). Мягкие температурные режимы 45 – 62 °С разрежение воздуха способствуют равномерному изменению тепло-влажностных характеристик заготовок. Главным преимуществом является высокое качество продукции. *Преимущество:* обеспечивает высокое качество высушенного продукта с минимальным количеством микротрещин. *Недостатки* – маленькие объёмы загрузки камеры, дороговизна установки и сложность технологического оборудования [32].

Удаление влаги массивной древесины в гидрофильных жидкостях. Удаление влаги производится в ванне. Внутри ванны находятся калориферы из гладких труб. Заготовки загружают в ванну в металлических контейнерах. Существенным недостатком этого способа является проникновение петролатума в древесину, что затрудняет обработку, препятствует ее склеиванию и лакированию (окраске). *Преимущество* – это способ позволяет проводить одновременную сушку-пропитку. *Недостатки* метода – жидкость проникает в древесину, что затрудняет дальнейшую обработку заготовки, достаточно высокая продолжительность процесса «обезвоживания» [9].

Сверхвысокочастотный нагрев (СВЧ) основан на проникновении электромагнитной энергии в материал и преобразовании ее в тепловую энергию. Проникновение электромагнитной энергии в материал происходит мгновенно. Ее поглощение составляющими материала происходит поразному, в зависимости от диэлектрических свойств [33] Для

промышленного использования выделены диапазоны частоты 435, 915, 2450 МГц, для сушки больших объемом пиломатериалов используют частоты 435 и 915 МГц. Этот метод удаления влаги применяют для бревен, клееного бруса, пиловочного материала любых пород древесины. *Преимущества:* уменьшается проявление внешних и внутренних повреждений в древесине, улучшается качество высушиваемой продукции, быстрый объемный прогрев продукта при низких значениях напряженности электрического поля, возможность простой автоматизации и механизации процесса обезвоживания, мобильность сушильных камер, осуществление бесконтактного нагрева. Основной *недостаток* способа высокая стоимость магнетронных генераторов. [34]

Кондуктивная сушка. Данным способом сушат тонкие и плоские заготовки в форме листов (шпон, фанера и т.д.), тепло к листам передается с помощью нагретой плиты (150 °С), непосредственным контактом. *Преимущества* – высокая интенсивность сушки при низком расходе тепла. *Недостатки:* сравнительно низкое качество высушенной древесины из-за одностороннего подвода тепловой энергии к материалу, в результате чего появляется потемнение в месте сопряжения нагревателя и заготовки в случае чрезмерной выдержке, опасной перегрева материала [27].

Радиационная сушка. 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 увеличение негативного влияния радиационного воздействия на персонал [35]. К *преимуществам* метода относится возможность избирательного поверхностного или глубокого нагрева заготовки[21].

Достаточно серьезной проблемой при проектировании сушильных камер является то, что на данный момент нет единого точного способа и критерия для оценки энергозатрат на сушку. Например, удельные затраты на сушку 1 м³ бруса, не учитывая затраты на предварительный нагрев, зависят от региона выращивания и породы дерева, начального и конечного влагосодержания и степени обработки заготовки.

Наиболее точным критерием сравнения эффективности работы различных установок является: удельные энергозатраты на удаления 1 кг жидкости из материала. [36]

В работе [37] приведен сравнительный анализ установок

1. Модельный ряд лесосушильных камер КРЭС, разработанный группой ученых Белорусского государственного университета (БГУ). Установки реализуют комбинированный способ сушки древесины, основой которого является диэлектрический нагрев материала СВЧ-полем в сочетании с конвективным. Процесс сушки контролируется при помощи автоматического оборудования, управляемого оператором. В состав лесосушильных камер КРЭС входят: рабочая камера, микроволновые модули, тепловентиляторы и пульт управления. Лесосушильные камеры характеризуются малым энергопотреблением, высокой надежностью, короткими сроками окупаемости, высоким качеством сушки, мобильностью, а так- же упрочнением древесины в процессе сушки до 60 % [38].

2. Малогабаритная волноводная СВЧ-установка для сушки леса модели «МС-2» [39] комбинированного типа. Авторы и производитель – специалисты ОАО «КОДОС Станкоагрегат» (Россия).

3. Комбинированные конвективно-сверхвысокочастотные лесосушильные установки серии КСВЧ. Производитель – ООО «Микротехсервис» (Харьков, Украина). Установки предназначены для сушки любых пород древесины. Управление установкой полностью автоматическое [40]. Рабочий диапазон температур установки от +10 до - 50 °С.

4. Аэродинамические лесосушильные камеры модельного ряда КСА. Производитель – ООО «ТАЮР» (Брянск, Россия). Управление процессом сушки автоматизированно [41].

5. Модельный ряд Global kilns конвективных камер с вынужденной циркуляцией сушильного агента от представительства северо-западной компании «Global edge». Процесс удаления влаги ведётся под контролем микропроцессорной цифровой системы. Эти сушильные камеры могут применяться для обезвоживания мягких и твердых пород древесины [42].

6. Сушильные камеры ГЕЛИОС-ВАКУУМ (Москва, Россия) Комбинированные конвективно-вакуумные камеры для удаления влаги из ценных видов древесины (бук, палисандр, мореный дуб, тик и др.) Регулирование процесса обезвоживания полностью автоматическое. Особенность этих камер: работают в сочетании с водогрейными котлами, в которых может использоваться все виды топлива [43].

7. Индукционные сушильные камеры от компании «Станко-Комплект» косвенного нагрева СК-15, СК-10 (Новосибирск, Россия) [44].

8. Конденсационные сушильные установки серии АКС от ООО «ТОКО» с принудительной циркуляцией и конвективным обдувом хладагента по замкнутому циклу [45].

Таблица 1 - Основные технико-экономические показатели разнотипных 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	Период и ческий	Период и ческий	Период и ческий	Период и ческий	Период и ческий	Периодический
Рабочая частота, Гц	2,45*109	2,45*109		50	-	50	50	-
Объем камеры, м3	1,2-19,6	1,6	20-50	60-180	16-50	22-26	1,3-3,0	-
Объем загрузки, м3	0,4 - 7	1,6	7-15	20-60	4-16	12,5; 16,5.	3-30	6-20
Максимальная потребляемая	3-14	13	63-103	-	10-45	50,60.	6-9	25-90

мощность , кВт								
Затраты электроэнергии на сушку 1 м ³ , кВт*ч	260-1400	-	400-450	5-13	350	-	4,3-7,2	-
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 толщиной 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	2,5

По совокупности критериев наиболее перспективными методами сушки древесины являются СВЧ-нагрев [36]. Однако, примерно, 90% сушильных камер, используемых в России, являются конвективными, не смотря на ряд недостатков (неравномерное просыхание бруска в штабеле, повышенный брак, длительность сушки, большие энергозатраты), так как они проще в эксплуатации и дешевле [45]. Более эффективно развивать сушку на местах производств пилопродукции, то есть на лесопильных предприятиях. Преимущества сушки непосредственно на лесопильных предприятиях: применение камер непрерывного действия большой производительности, что

во многом снижает себестоимость процесса обезвоживания. Также снижается плотность древесины, соответственно значительно уменьшается стоимость перевозки. [46].

Из всего вышперечисленного следует, что, несмотря на, все недостатки конвективного метода сушки, он и по сей день является базовым способом о «обезвоживания» влажной древесины. Соответственно можно сделать вывод о том, что наиболее перспективным направлением в науке о сушки дисперсных материалов является изучение процессов тепло и массопереноса в условиях комбинированного радиационного и конвективного нагрева.

Это необходимо для получения высококачественного продукта с минимальными затратами на электроэнергию [47].

1.2 Разработанные методы расчета процесса сушки влажной древесины дисперсных и пористых материалов

Сушка древесины является важной частью технологического процесса, которое непосредственно влияет на качество продукта, поэтому совершенствование технологии обезвоживания бруска уделяется много внимания [48]. Используемые на практике методы удаления влаги и существующие системы регулирования процессов не имеют возможности автоматизированного регулирования и реагирования на изменение режимов теплообмена при сушке материалов [49]. Нормативные и справочные источники регламентируют применение ступенчатых режимов сушки, заданных в форме зависимости параметров сушильного агента от времени.

Такой способ управления процессом обезвоживания не обеспечивает необходимых динамических характеристик изменения влагосодержания древесины от времени. Он учитывает особенности физических параметров бруска, но не имеет обратных связей по действительному состоянию материала в процессе влагоудаления. Усовершенствование технологии процесса обезвоживания продукции можно осуществить с переходом на регулирование по фактическому влажностному состоянию древесины. Существующие на данный момент средства и расчетные методы

определения динамики процесса влагопереноса в образце не могут решить эту проблему на высоком уровне, и требуется научное обоснование подхода с внедрением передовых средств математического обеспечения.

1.3 Процесс тепло- и влагопереноса в процессах сушки

Явление переноса тепла в процессах сушки

Процесс сушки бруска всегда сопровождается нагревом древесины. Преимущественно имеет место конвективный нагрев. В производственной практике встречаются два основных случая:

1. Заготовка нагревается в насыщенном водяном паре (пропарка перед удалением влаги); [21]
2. Древесина нагревается в воздухе при $\varphi < 1,0$. [21]

При нагреве в насыщенном паре, если влагосодержание в древесине выше предела насыщения отсутствует изменение агрегатного состояния воды, а если влажность в материале ниже насыщения происходит увлажнение поверхности материала. Для расчета переноса тепла в этом случае удаления влаги пригодны уравнения классической теории теплопроводности.

Во втором случае, теплота поглощаемая древесиной, расходуется на нагрев и на испарение воды. Особенность процесса:

- на начальной стадии брусок нагревается до температуры предела охлаждения $t_{по}$ (температуры смоченного термометра, изменение влагосодержания на этом этапе не наблюдается);

- во втором этапе происходит интенсивное испарение свободной влаги с поверхности продукта. Теплота расходуется в основном на фазовый переход (до 60 %), температура материала практически не меняется;

- в третьей стадии процесса, влажность древесины постепенно приближается к равновесному значению, а температура материала становится равной температуре внешней среды. Следовательно, решая уравнение теплопроводности можно установить длительность только начального прогрева бруска.

Таким образом, для анализа этих процессов могут использоваться уравнения и методы теории теплопроводности. При этом учитывается, что процесс определяется двумя явлениями: теплопроводностью внутри материала и теплообменном продукта с сушильным агентом.

Явление переноса влаги в процессах сушки

Особенность процесса удаления влаги определяется характером влагопереноса. При неравномерном распределении влаги внутри заготовки имеет место ее движение в направлении пониженной влажности. Это движение вызвано градиентом влажности по объему образца.

Движение влаги будет происходить, если температура бруска неравномерна по объему и будет направленно в зоны пониженной температуры. Отсюда следует, что на движение влаги влияет перепад температур.

Если во внутренних слоях материала создано избыточное давление по сравнению с внешней средой, то под действием давления влага в виде водяных паров будет фильтроваться в зоны более низких давлений [21].

1.4 Теория и практика радиационно-конвективной сушки

Процесс сушки древесины является технологическим процессом, который определяет качество продукции. Основной показатель, характеризующий конкурентоспособность товара является качество удаления влаги из древесины. [50.]

Процесс «обезвоживания» древесины, механизм тепло- и влагопереноса имеет множество проблем, обусловленных физико-механическими свойствами (теплопроводностью, плотностью, влажностью, прочностью, твердость) разнообразных пород древесины (дуб, берёза, пихта, ель, ясень, сосна и т.д.), так же не мало важным фактором является размер образца, подвергаемый сушки. Всё вышперечисленное существенно затрудняет совершенствование обработки влажной древесины для её дальнейшего использования [50].

Главные положения кинетики сушки были впервые сформулированы учёными: П.С. Коссовичем и А.В. Лебедевым. Они установили, что механизм перехода влаги внутри почвы определяется формой связи воды с влажными дисперсными материалами, а процесс удаления влаги имеет свою периодичность. Дальше эти положения развивали: Ю.Л.Кавказов [51], И.М. Федоров [52], Г.Л. Филоненко [53], Ф.Е. Калясов, Я.М. Митин [54] и другие. В 30-х было применено устройство классической теории диффузии, описывающий перенос влаги внутри материала это было сделано учёными из США У.К. Льюисом и Т.К. Шервудом [55]. Последний же выдвинул гипотезу углубления поверхности испарения внутрь материала.

На следующем этапе развития теории сушки установили явление влагопереноса А.В. Лыков [56], Кришер в 1933-1935 гг., что являлось почвой для создания системы дифференциальных уравнения тепло- и влагопереноса в капиллярнопористых телах, эта система находится в соответствии с основными положениями термодинамики необратимых процессов.

Источники тепла и влаги учитываются с помощью критерия фазовых превращений, были получены основные числа и критерии подобия кинетики процесса обезвоживания. Спустя 35 лет теория углубления поверхности испарения получило полное экспериментальное подтверждение, далее установили взаимную связь между критерием фазовых превращений и скоростью углубления зоны испарения. Завершение этих исследований ознаменовало собой формирование наиболее подробной математической и физической модели процесса тепло- и массопереноса при сушке древесины .

Значимую часть в сфере технологии сушки приобретает наука о формах связи влаги с материалом, которая была создана советским академиком П.А. Ребиндером [57]. Математическое выражение, определяющее энергию связи воды с брусом.

Л.К. Рамзиным был создан метод расчета сушильных аппаратов, а в 1918 году он предложил Id-диаграммы влажного воздуха. И по сей день разработанные им положения остаются базой для расчета процесса сушки

дисперсных влажных материалов, так же существенное дополнение к теории расчета сушильных камер были сделаны профессором Гомареном И.В. Кречетовым [58] и Ш. Эндрени.

Основной вклад в создании и развитие теории влаго- и теплопереноса внесли ученые А.В. Лыков, П.Д. Лебедев [59], Ю.А. Михайлов [60], А.Г. Темкина, М.С. Смирнов, Н.Н. Гамаюнов, А.С. Гинзбурга [61], П.Г. Романкова, В.В. Красникова.

В работах А.В. Лыкова, П.С. Серговского [62], И.В. Кречетова, Г.С. Шубина [63], Б.С. Чудинова [64] рассмотрены методы расчета процессов тепло- и массопереноса при сушки древесины [56].

Выделяют три главные области изучения процесса сушки: статику, кинетику и динамику сушки.

Статика сушки устанавливает взаимодействие между начальными и конечными температурными и влажностными параметрами сушильного агента и древесины, позволяющая определить расход энергии сушки и сушильного агента.

Кинетика сушки изучает закономерность изменения температуры древесины и содержание влаги во времени в процессе удаления влаги, а так же уравнение кинетики позволяет определить время «обезвоживания» и выбрать оптимальный режим сушки. Механизм тепломассопереноса внутри влажного материала очень сложный процесс, он определяется характером связи влаги с древесиной, поэтому кинетика процесса сушки определяется, физико-химическими свойствами обезвоженного материала.

Динамика сушки устанавливает закон движения влаги в древесине при сушке, с помощью задачи динамики сушки можно получить нестационарные поля температуры и содержание влаги в древесине. [56]

2 Актуальность и инновации

На данный момент теоретическое изучение процессов тепло- и массопереноса основывается на математическом моделировании с применением электронно-вычислительной машины [65]. Моделирование стало возможным в результате технического прогресса в сфере вычислительной техники, а также вследствие формирования вычислительных методов решения задач математической физики [66].

Численное моделирование процессов тепло- и массопереноса в настоящее время приобретает всё большую роль. Для современной науки и техники нужен точный прогноз процессов тепло- и массопереноса, экспериментальные исследования которых очень дорогостоящие и сложные, а иногда и попросту неосуществимы. Математическое моделирование позволяет избавиться от сложных экспериментов при изучении процесса обезвоживания древесины [66]. Натурное изучение процесса удаления влаги из древесины затруднительно, потому что существует разные породы и виды деревьев (кедр, клён, дуб, тик, берёза, осина, бук, ясень, венге, граб, падук, ироко и т.п.) с различными начальными характеристиками (вид сруба, влажность, начальная температура, линейные размеры и т.д.). Например, по степени влажности различают:

- «мокрая» древесина с влажностью более 100%, такая древесина долго лежала в воде;
- свежесрубленная заготовка, её влажность варьируется от 50% до 100%, (сохранившая влажность дерева);
- воздушно-сухой брус (W = 15÷20%), это дерево, которое лежало на открытом воздухе;
- комнатно-сухая древесина её влажность будет от 8% до 12% , такая древесина находилась долгое время в отапливаемом помещении;
- абсолютно сухая заготовка имеет влажность W = 0%, другими словами обезвоженная древесина [19].

Системы регулирования процессом удаления влаги из древесины во многих изготавливаемых сушильных установках базируются на приближенных эмпирически определенных зависимостях процесса обезвоживания, они предусматривают только характеристики сушильного агента и не учитывают температуру и влажность бруска в течение процесса обезвоживания, а также не могут решить проблему энергоэффективности. Справочная и нормативная документация регламентирует использование ступенчатых режимов сушки древесины, что даёт возможность только косвенно учитывать влажностное состояние заготовки и изменение её теплофизических параметров.

Раньше время полного обезвоживания материала определялось по номограммам, которые были построены на базе натуральных экспериментов на старом оборудовании. В этих номограммах не учитывали движение фронта испарения, распределение температуры по толщине бруска, а также изменение теплофизических параметров древесины. Последнее является значительным физическим допущением.

Ниже приведен пример расчета времени полной сушки на основе номограмм из учебного пособия И.В. Кречетова Сушка древесины. – М.: Лесная промышленность, 1980. – 432 с.:

Дано: Начальная температура доски равна 10°С, после нагревания в середине образца температура равняется 70° С, температура сушильного агента 80° С, толщина бруска 0,6 м, или R =0,03 м, коэффициент теплообмена $a=7\text{Вт}/(\text{м}^2\text{°С})$, теплопроводность древесины составляет $\lambda=0,21\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{°С})$, коэффициент температуропроводности $a=0,0005\text{ м}^2/\text{с}$. Определить время сушки бруска.

Безразмерная температура равна:

$$\Theta = (t_{cp}-t)/(t_{cp}-t_0) = (80-70)/(80-70) = 0,13$$

Критерий Био:

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

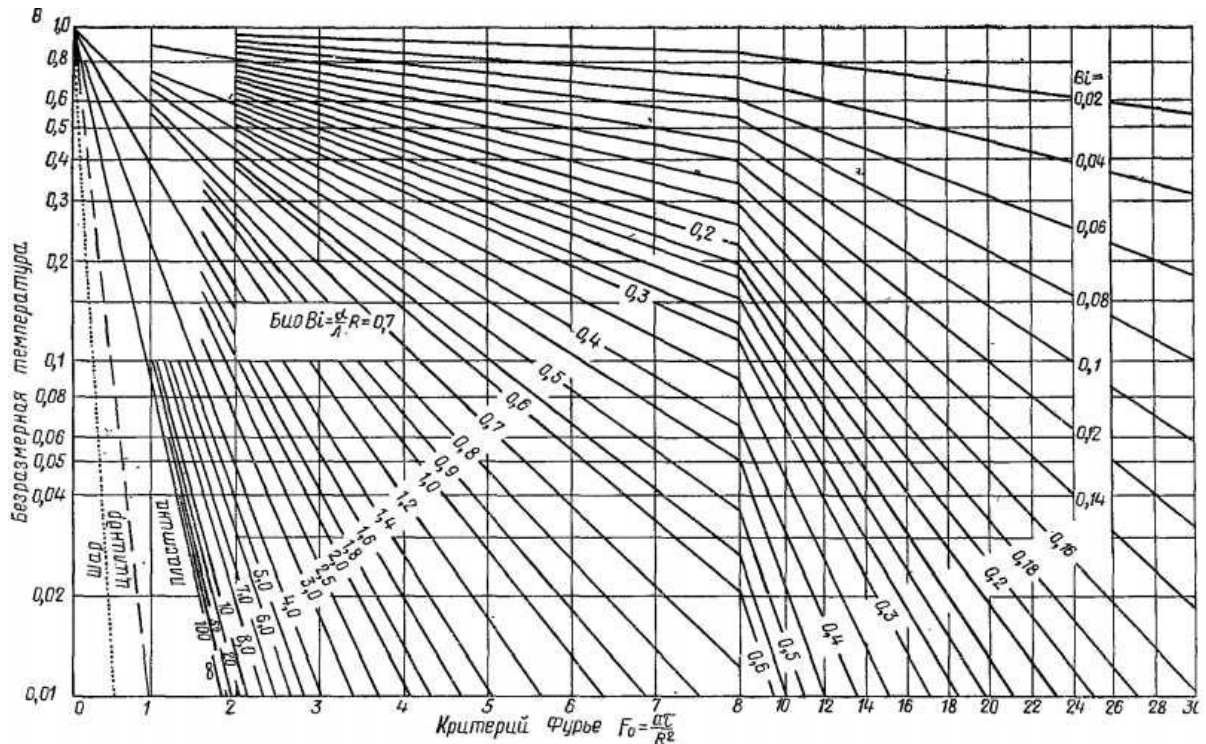


Рис. 1. Выкопировка из пособия [57]. Графическая зависимость $Fo(\theta, Bi)$ для неограниченной пластины.

На оси ординат находим $\theta=0,13$ и, передвигаемся по горизонтальной линии до наклонной $Bi=1$, отсчитаем снизу $Fo=2,7$. В результате, время нагрева бруска:

$$\tau = FoR^2/a = (2,7 * 0,03^2) / 0,0005 = 5 \text{ ч.}$$

Выше приведенная методика (пример) показывает, что классические методы расчета времени обезвоживания влажной древесины основываются на существенно упрощающих процедурах моделирования допущениях, которые не учитывают: распределение температуры внутри образца, изменение теплофизических характеристик, пористость и движение водяных паров по толщине бруска. По этой причине численное моделирование процессов удаления влаги из пористых материалов является наиболее приемлемым методом для расчета условий и характеристик сушки древесины.

Математическое моделирование с глубокой детализацией процесса испарения влаги из диэлектрика при разных начальных параметрах

(температура окружающей среды и интенсивность теплообмена) и при различных характеристиках самой заготовки (линейные размеры, порода древесины, начальная влажность и температура, поперечный или продольный срез). Это позволяет производить расчеты, с достаточно высокой степенью точности, временных характеристик процесса сушки для древесины.

3. Постановка задачи

3.1 Физическая постановка задачи

На рисунке 2 представлена принципиальная схема сушильной установки. В работе предполагалось, что имеется заготовка, загружаемая в сушильную камеру, далее в камеру поступает нагретый воздух в теплогенераторе, также имеется источник радиационного излучения.

В начальный момент ($\tau=0$) времени древесина поступает в сушильную камеру и начинает нагреваться за счет конвекции и излучения. Вследствие нагрева начинается испарение влаги из бруска.

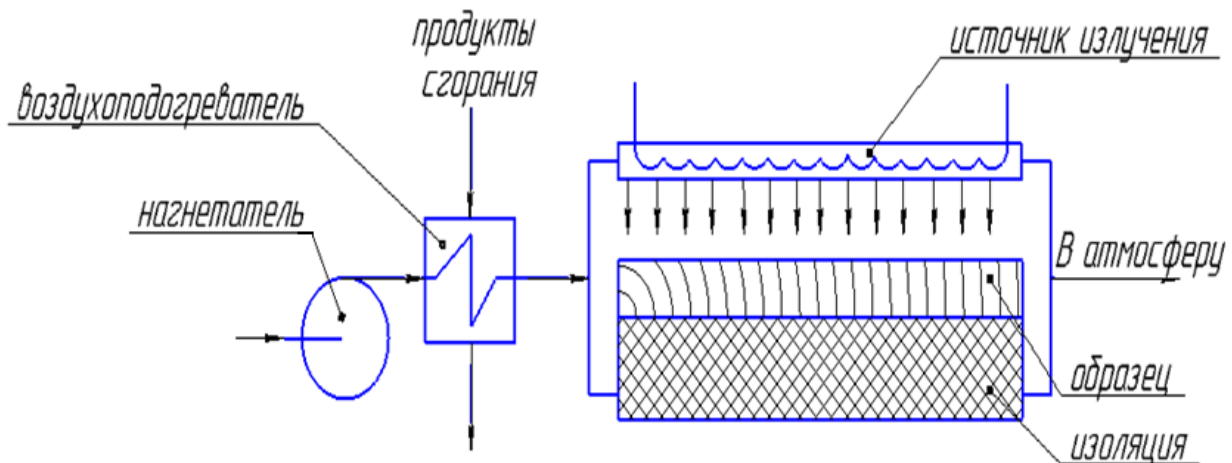


Рис. 2. Принципиальная схема сушильного аппарата для радиационно-конвективной сушки древесины

Фронт (Рис.3) испарения движется от поверхности вглубь заготовки. Вследствие чего образуется слой сухой древесины с низким коэффициентом теплопроводности.

Промежуток времени от начала нагрева до момента полного «обезвоживания» материала (прохода фронта испарения по всей заготовке), считается временем удаления влаги (τ сушки).

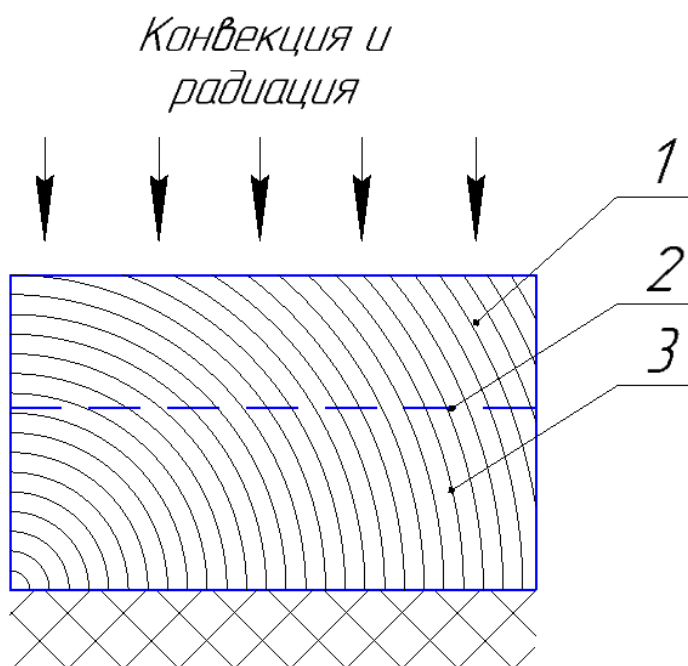


Рис. 3. Схема области решения задач

1 – сухая древесина, 2- фронт испарения, 3 – влажная древесина;

Процесс «обезвоживания» рассматривается в рамках фронтальной модели испарения влаги. Необходимо отметить, что процессы фазовых превращений являются одними из самых сложных задач математической физики. Особенно это касается процессов испарения. Последнее связано с тем, что испарение влаги происходит в очень узкой (много меньше линейного размера образца) постоянно перемещающемся фронте испарения. При этом стоит отметить, что испарение воды протекает с высоким эндотермическим эффектом (до $2,5 \cdot 10^6$ Дж/кг). Также необходимо сказать, что в процессе «обезвоживания» древесины формируется пористый древесный каркас с высоким термическим сопротивлением. Последний существенно затягивает процесс влагоудаления из образца.

По этим причинам проведение процедуры моделирования процесса сушки влажной древесины необходимо применять различные методы релаксации теплового стока на границе раздела системы «сухое дерево - влажная древесина», например, одним из таких способов является метод размазывания фронта испарения, который применялся в нашей работе.

3.2 Математическая постановка

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

Уравнение энергии влажной древесины с учетом эндотермического эффекта испарения:

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}) - \frac{Q_{isp}W_{isp}}{h_d} \quad (1)$$

Уравнение (1) решалось при следующих краевых условиях и замыкающих соотношениях:

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

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

$$: x = L: \lambda\frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T_e - T) + \sigma\varepsilon(T_e^4 - T^4); \quad (3)$$

Поставленная задача математической физики решалась методом конечных разностей [66-68]. Задача удаления влаги решалась методом неявного выделения фронта испарения. [69]

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

Таблица 2

	C_p , Дж/м ³ °С	λ , Вт/м°С	ρ , кг/м ³
Дерево - береза	1250	0,15	600
воздух	4187	0,034	1
вода	1000	0,6	1000

3.3 Тестовые задачи

С целью верификации математической модели решён ряд тестовых задач.

Решение одномерного уравнения теплопроводности

Рассматривается процесс теплопереноса через плоскую бесконечную пластину с конечной толщиной. На левой границе пластины рассматриваемой задачи поддерживается температура $T_{л}$, а на правой температура $T_{п}$. Начальная температура в пластине – T_0 . Внутренним источником тепловыделения пренебрегаем.

Процесс тепломассопереноса описывается одномерным уравнением теплопроводности:

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

Граничные условия и замыкающие соотношения принимаются следующие:

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

$$x = 0: T = T_{л}, \quad t > 0; \quad (3)$$

$$x = L: T = T_{п}, \quad t > 0.$$

Даны следующие параметры плоской пластины: материал сталь ($\rho=7800$ кг/м³, $\lambda = 46$ Вт/(м·°C), $c=460$ Дж/(кг·°C)), $L = 0.1$ м, $T_0 = 20$ °C, $T_{п} = 100$ °C, $T_{л} = 100$ °C.

Время нагрева – 60секунд.

Результаты численного моделирования приведены на рисунке 4.

Если проанализировать кривые на рисунке 4, полученные в результате численного решения системы (1) - (3) и аналогичные зависимости, приведенные в [66], то можно отметить, что полученные поля температур идентичны.

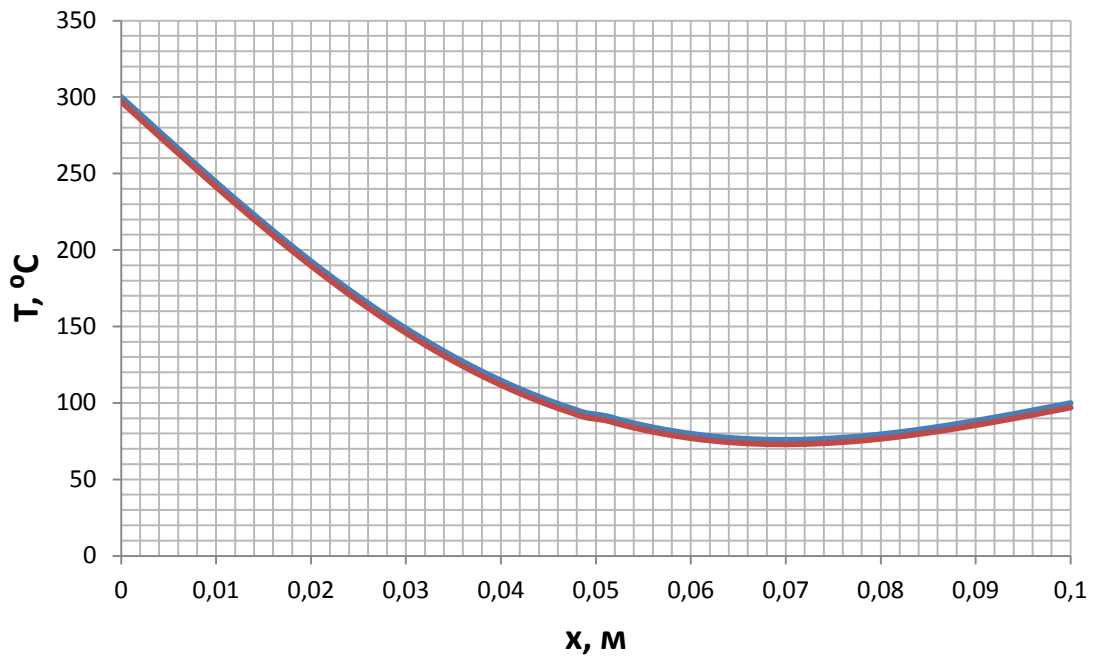


Рис. 4. Распределение температуры по толщине пластины в момент времени $t = 60$ с

Решение задачи теплопроводности с внутренними источниками

Неограниченная пластина толщиной $L=0.3$. В пластине точечно размещены источники тепловыделения с мощностью $Q(x)$. Источники тепловыделения находятся в точках $x \in A = \left\{ \frac{L}{4}, \frac{L}{2}, \frac{3 \cdot L}{4} \right\}$.

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

Данные задачи: материал пластины ($\lambda = 419$ Вт/(м·°C), $\rho = 10500$ кг/м³, $c = 200$ Дж/(кг·°C)). Начальная температура пластины $T_0 = 15$ °C. На границах происходит теплообмен с внешней средой (интенсивность теплообмена $k = 50$ Вт/(м·°C), температура внешней среды $T^e = 60$ °C). Определим распределения температуры в моменты времени: 1 с, 5 с и 10 с.

Распределение температур в пластине описывается уравнением теплопроводности:

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

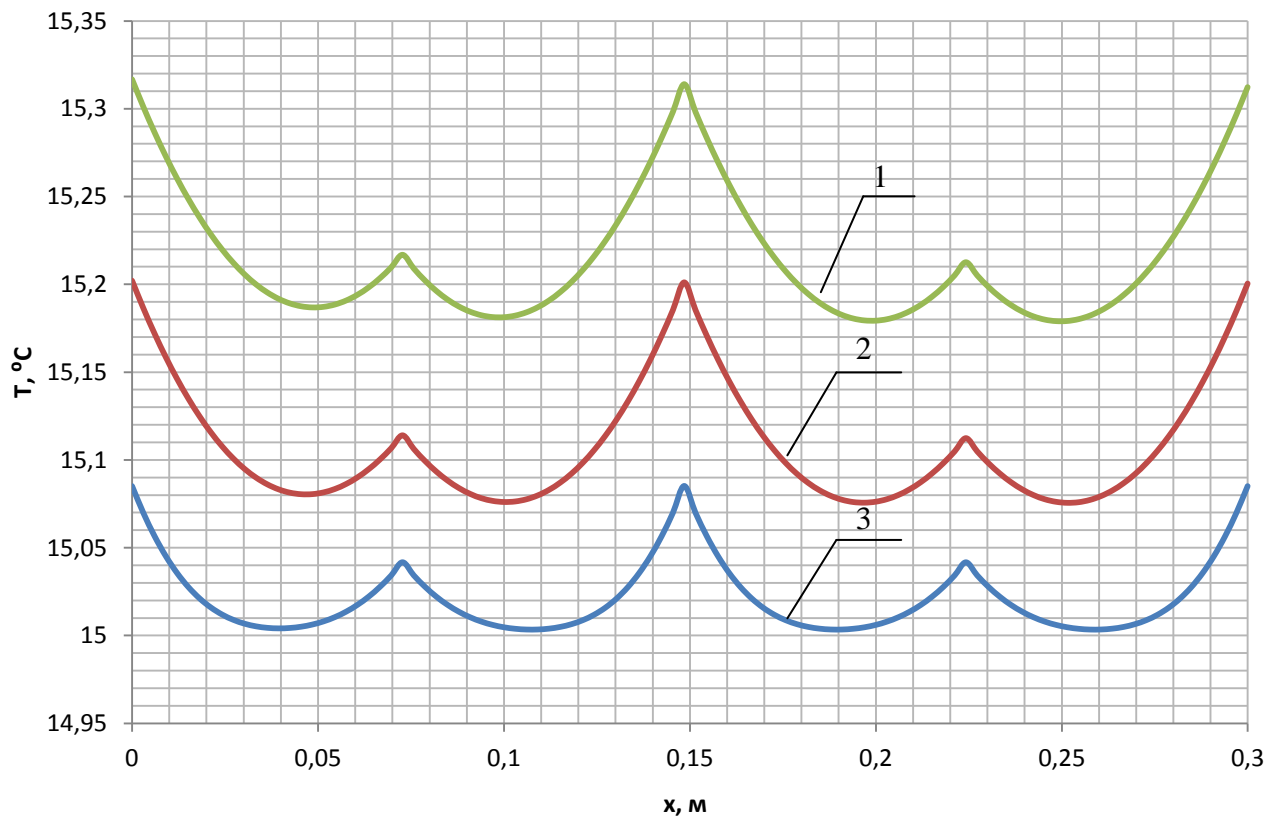
Граничные и начальные условия имеют следующий вид:

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

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

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

Полученные результаты распределения температур приведены на рисунке 5.



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

Если проанализировать зависимости, приведенные на рисунке 5, полученные в результате решения системы (1) - (3) и аналогичные кривые, приведенные в [66], то можно сказать, что полученные распределения температур идентичны.

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

Влажный грунт прибывает в талом состоянии с начальной температурой T_0 . На поверхности грунта в начальный момент времени внезапно устанавливается температура T_c , которая будет ниже температуры промерзания T_3 . В итоге появляется промерзший слой переменной толщины $\xi = f(t)$. Низшая граница промерзшего слоя имеет температуру замерзания T_3 . На этой границе происходит фазовый переход и соответственно выделение теплоты Q_f . В результате нижняя граница имеет температуру грунта на глубине, а верхняя граница – постоянную температуру замерзания.

Уравнение энергии в поставленной задаче имеет следующий вид:

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

Граничные условия и замыкающие соотношения имеют следующий вид:

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

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

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

Для системы «влажный грунт - промерзший грунт» граничные условия четвертого рода будут иметь вид:

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

Данные задачи: глубина грунта составляет $L = 0.3$, теплофизические параметры промерзшей ($\lambda = 2.3$ Вт/(м·К), $\rho = 917$ кг/м³, $c = 2090$ Дж/(кг·К)) и влажной ($\lambda = 0.6$ Вт/(м·К), $\rho = 1000$ кг/м³, $c = 4220$ Дж/(кг·К)) области грунта, начальная температура грунта $T_0 = 293$ К, температура замерзания $T_3 = 273$ К,

температура на поверхности $T_c=268$ К, относительная влажность $\omega = 1$ кг/кг, теплота фазового перехода $Q_{\phi}=3.32 \cdot 10^5$ Дж/кг.

Полученные результаты распределения температур приведены на рисунке 6.

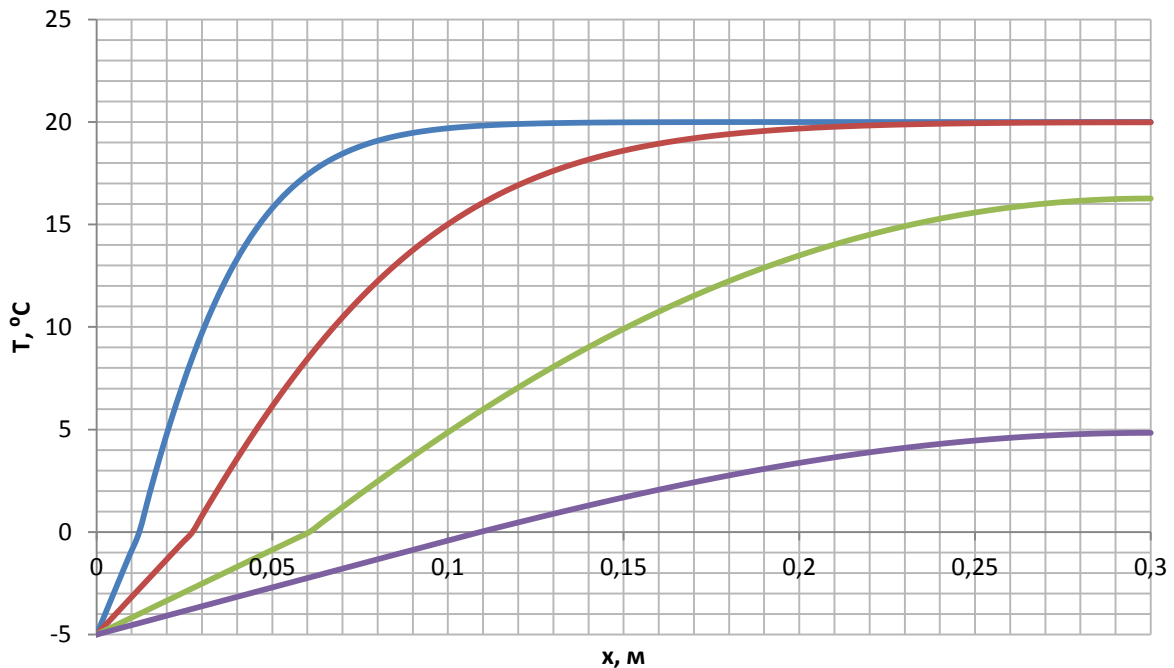


Рис. 6. Распределение температуры по глубине грунта

Если проанализировать зависимости, приведенные на рисунке 5, полученные в результате решения системы (1) - (3) и аналогичные кривые, приведенные в [66], то можно сказать, что полученные распределения температур одинаковые.

Решение одномерного уравнения теплопроводности с нелинейными граничными условиями (излучение на границе)

Рассмотрим теплоперенос в плоской бесконечной пластине. Моделировать процесс теплообмена на границах области решения будем с учетом излучения (на основе закона Стефана-Больцмана) и конвекции.

Распределение температур в пластине описывается уравнением энергии:

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

Граничные условия и замыкающие соотношения принимаются следующие:

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

$$x=0: -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = k_1 (T^{e1} - T) + \varepsilon_1 \sigma ((T^{e1})^4 - T^4), \quad t > 0, k_1 > 0; \quad (3)$$

$$x=L: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = k_2 (T^{e2} - T) + \varepsilon_2 \sigma ((T^{e2})^4 - T^4), \quad t > 0, k_2 > 0;$$

Исходные данные: толщина пластины $L = 0.3$ м, теплофизические характеристики бетонной пластины ($\rho = 2000$ кг/м³, $\lambda = 0,9$ Вт/(м·°C), $c = 920$ Дж/(кг·°C)), начальная температура $T_0 = 50$ °C, пластина контактирует с окружающей средой ($T^{e1} = 30$ °C, $T^{e2} = 70$ °C, $k_1 = 1000$ Вт/(м·°C), $k_2 = 1000$ Вт/(м·°C), $\varepsilon_1 = 0.5$, $\varepsilon_2 = 0.2$).

Полученный результат представлен на рисунке 7.

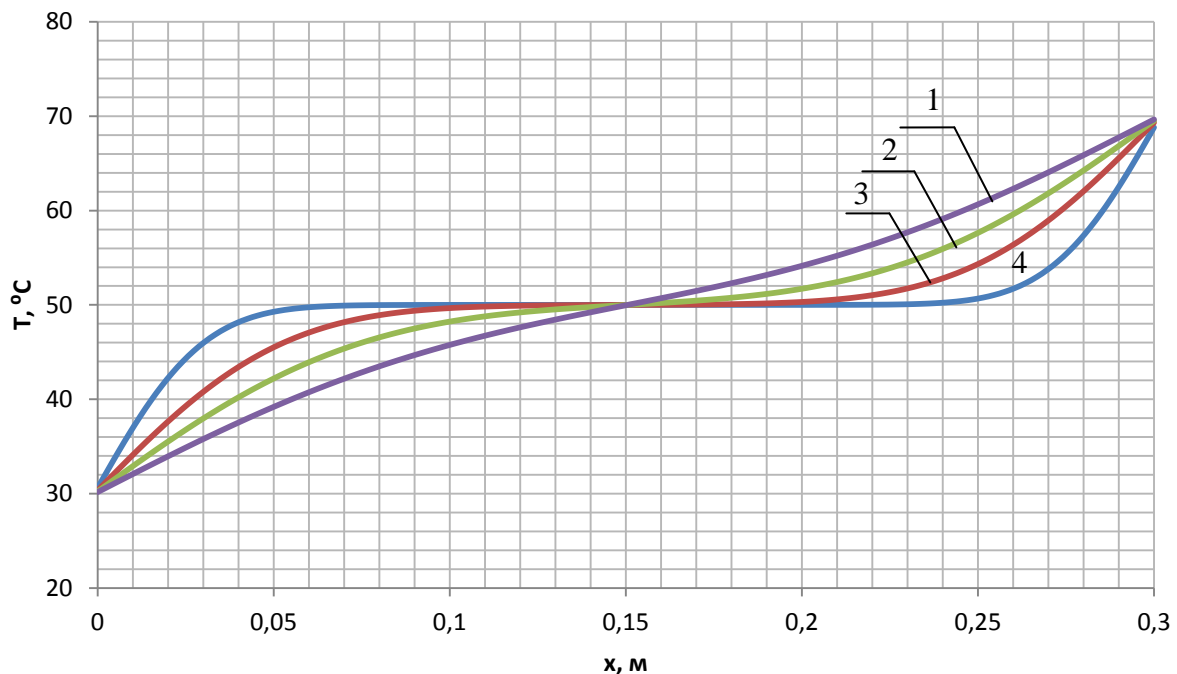


Рис. 7. Распределение температуры по толщине пластины в разные моменты времени

1- 600, 2 – 1800, 3 – 3600, 4- 7200.

Если проанализировать кривые на рисунке 7, полученные в результате численного решения системы (1) - (3) и аналогичные зависимости, приведенные в [66], то можно отметить, что полученные поля температур идентичны.

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

Студенту:

Группа	ФИО
5Б2Б	Косторева Анастасия Андреевна

Институт	Энергетический	Кафедра	теоретической и промышленной теплотехники
Уровень образования	бакалавриат	Направление	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):

--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

--

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б2Б	Косторева Анастасия Андреевна		

5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Тема: Математическое моделирование процессов тепломассопереноса при радиационно-конвективной сушке древесины.

5.1 Хозяйственные цели проекта

1) Математическое моделирование с глубокой детализацией процесса испарения влаги из диэлектрика при разных начальных параметрах (температура окружающей среды и интенсивность теплообмена) и при различных характеристиках самой заготовки (линейные размеры, порода древесины, начальная влажность и температура, поперечный или продольный срез) позволяет производить расчеты временных характеристик процесса сушки для древесины;

2) Получение распределения температуры по толщине образца, следовательно, определение температуры в любой точке заготовки;

5.2 Преимущества моделирования по сравнению с экспериментальным исследованием

1) Моделирование позволяет исключить сложные и дорогостоящие эксперименты для исследования процесса сушки древесины. 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.) с различными характеристиками (линейные размеры, влажность, начальная температура, вид сруба и т.д.);

2) Ранее время полной сушки древесины определяли по номограммам, построенным на основе экспериментов на старом оборудовании. В них не учитывалось распределение температур по толщине образца, движение фронта с изменением теплофизических характеристик и т.д. Следовательно,

неточность этих номограмм была достаточно высока, поэтому качество древесины страдало;

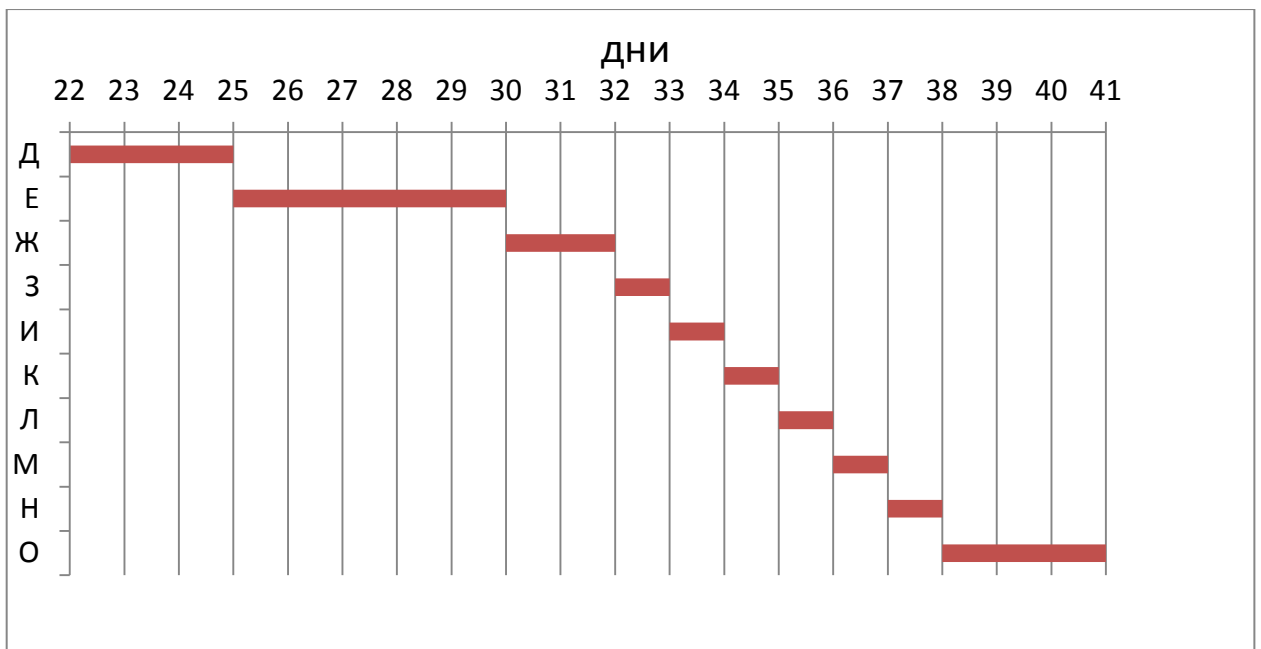
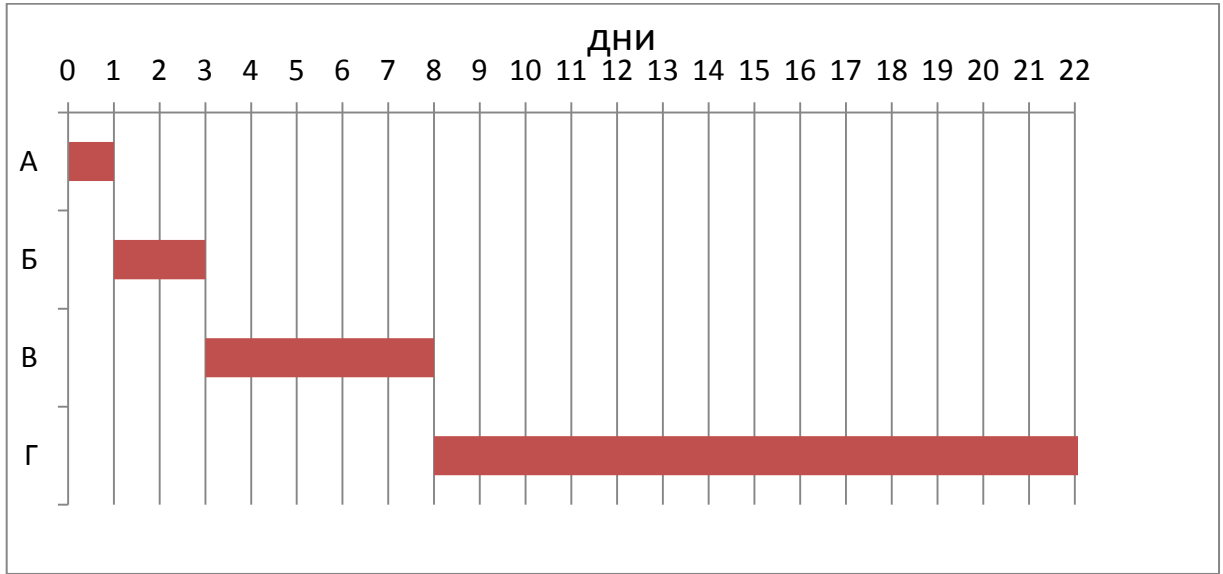
5.3 Календарный план-график выполнения НИР

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 1.

Таблица 3 – Календарный план выполнения НИР

Код работы	Наименование работы	$t_{\min i}$, день	$t_{\max i}$, день	У, человек	$t_{\text{ож}} i$, день
а	Составление и утверждение технического задания	1	1	1	1
б	Оформление технического задания	1	1	1	1
в	Подбор теоретической информации	5	7	1	5
г	Разработка программного обеспечения	10	20	1	15
д	Математическое моделирование	2	3	1	3
е	Построение графических зависимостей	5	7	1	5
ж	Анализ результатов	2	5	1	2
	<i>Разработка экономической части</i>				
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	1	3	1	3

Представим графически календарный план выполнения НИР. Для этого построим диаграмму Ганта.



5.4 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 _i) [1-5]	5	3	5	5	18
Вес (W _i)	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 _i) [1-5]	5	3	2	4	14
Вес (W _i)	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
Pascal	8,27	8,84	8,44	8,64	34,19
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

5.5 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	-	-	-	715
Заправка картриджа	шт	500	1	500
Электроэнергия	кВт·ч	4,25	66,1	281
Итого:				1496

Таблица 10 – Стоимость канцтоваров для выполнения НИР

Наименование:	Цена
Бумага	200
Ручка	15
Флешка	500
Итого:	715

Таблица 11 – Потребление электроэнергии при выполнении НИР

Источник потребления	Мощность, кВт/ч	Кол-во часов	Итого:
Персональный компьютер	0,2	300	60
Ноутбук	0,06	50	3
Освещение	0,05	60	3
Принтер	0,05	2	0,1
Итого:			66,1

В связи с изнашиванием оборудования в процессе выполнения работы стоит учитывать затраты на его амортизацию.

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
Итого:							1222,76

