

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

---

Институт – Энергетический институт  
Направление подготовки – Теплоэнергетика и теплотехника  
Кафедра – Автоматизация теплоэнергетических процессов

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

| Тема работы                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Разработка прогностической модели для определения оптимальных условий изготовления кабельных термопар |

УДК 621.315.22:536.53-036.7

Студент

| Группа | ФИО                     | Подпись | Дата |
|--------|-------------------------|---------|------|
| 5БМ5Д  | Яшутина Ольга Сергеевна |         |      |

Руководитель

| Должность | ФИО          | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-----------|--------------|---------------------------|---------|------|
| доцент    | Иванова Е.В. | к.ф.-м.н.                 |         |      |

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность | ФИО         | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-----------|-------------|---------------------------|---------|------|
| доцент    | Попова С.Н. | к.э.н.                    |         |      |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО              | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-----------|------------------|---------------------------|---------|------|
| доцент    | Василевский М.В. | к.т.н.                    |         |      |

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

| Зав. кафедрой | ФИО          | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|---------------|--------------|---------------------------|---------|------|
| АТП           | Стрижак П.А. | д. ф-м.н.                 |         |      |

Томск – 2017 г.

Выпускник, освоивший программу магистратуры по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», должен обладать следующими компетенциями, в соответствии целями основной образовательной программы, видами и задачами профессиональной деятельности, указанными в ФГОС ВО.

*Планируемые результаты обучения*

| Код<br>результата                                                  | Результат обучения<br>(выпускник должен быть готов)                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Требования ФГОС,<br>критериев и/или<br>заинтересованных сторон                                                                                   |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Профессиональные компетенции</b>                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                  |
| <i>расчетно-проектная и проектно-конструкторская деятельность:</i> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                  |
| P1                                                                 | применять передовые знания и достижения для формулирования заданий на разработку проектных решений, проектировать инновационные теплоэнергетические и теплотехнические системы и оборудование, разрабатывать проектные решения, связанные с модернизацией технологического оборудования                                                                     | Требования ФГОС (ПК-1, ПК-2), Критерий 5 АИОР (п.2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>       |
| <i>производственно-технологическая деятельность:</i>               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                  |
| P2                                                                 | интегрировать знания различных областей для разработки мероприятий по совершенствованию технологии производства, обеспечению экономичности, надежности и безопасности эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования, средств автоматизации и защиты                                          | Требования ФГОС (ПК-3, ПК-4, ПК-5), Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> |
| P3                                                                 | применять современные методы и средства практической инженерной деятельности в области теплоэнергетики и теплотехники, автоматизированных систем управления технологическими процессами в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях                                                                                                                  | Требования ФГОС (ПК-5, ПК-6), Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> |
| <i>научно-исследовательская деятельность:</i>                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                  |
| P4                                                                 | <b>применять глубокие знания для планирования и постановки задачи инновационного инженерного исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки, применять инновационные методы исследования, проводить исследования, критически интерпретировать, публично представлять и обсуждать результаты научных исследований</b> | Требования ФГОС (ОК-7), Критерий 5 АИОР (пп.2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>       |
| <i>организационно-управленческая деятельность:</i>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                  |

|                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| P5                                  | руководить коллективом специалистов различных направлений и квалификаций, действовать в нестандартных ситуациях, принимать организационно-управленческие решения и нести за них ответственность при организации работ, в том числе по осуществлению надзора при изготовлении, монтаже, наладке, испытаниях и сдаче в эксплуатацию установок, систем и оборудования | Требования ФГОС ((ОК-2, ПК-8, ПК-10), Критерии 5 АИОР (п.1.1), согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> |
| P6                                  | применять знания нетехнических ограничений инженерной деятельности, разрабатывать мероприятия по безопасности жизнедеятельности персонала и населения, предотвращать экологические нарушения                                                                                                                                                                       | Требования ФГОС (ПК-9), Критерии 5 АИОР (п.1.1), согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>               |
| <i>педагогическая деятельность:</i> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                    |
| P7                                  | осуществлять педагогическую деятельность в области профессиональной подготовки                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Требования ФГОС (ПК-11), Критерий 5 АИОР (пп.1.1, 1.2, 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>   |
| Универсальные компетенции           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                    |
| P8                                  | мыслить абстрактно, обобщать, анализировать, систематизировать и прогнозировать, принимать решения в сложных инженерных задачах с технической неопределенностью и недостатком информации                                                                                                                                                                           | Требования ФГОС (ОК-1), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>              |
| P9                                  | к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Требования ФГОС (ОК-3), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>              |
| P10                                 | использовать иностранный язык для эффективного взаимодействия в профессиональной сфере                                                                                                                                                                                                                                                                             | Требования ФГОС (ОПК-3), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>             |

**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 – Автоматизация теплоэнергетических процессов

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой  
\_\_\_\_\_ Стрижак П.А.  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

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

В форме:

|                          |
|--------------------------|
| Магистерской диссертации |
|--------------------------|

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

| Группа | ФИО                      |
|--------|--------------------------|
| 5БМ5Д  | Яшутиной Ольге Сергеевне |

Тема работы:

|                                                                                                       |                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Разработка прогностической модели для определения оптимальных условий изготовления кабельных термопар |                      |
| Утверждена приказом директора (дата, номер)                                                           | 21.04.2017, № 2828/с |

|                                          |  |
|------------------------------------------|--|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: |  |
|------------------------------------------|--|

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

|                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Исходные данные к работе</b> | Кабельные термопары производятся с помощью полимеризационных печей, в которых поддерживается постоянная температура, в течение определенного промежутка времени. При разработке автоматизированной системы управления полимеризационной печи предусмотрено использование современных микропроцессорных технических средств автоматизации для реализации функций автоматического контроля параметров и управления системой. |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p>                                     | <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Проведение аналитического литературного обзора по современному состоянию исследований процессов теплопереноса при изготовлении кабельных термопар.</li> <li>2) Разработка математической модели с одним термоэлектродом, учитывающая процесс полимеризации изоляционного слоя.</li> <li>3) Разработка математической модели с двумя термоэлектродами, учитывающая процесс полимеризации изоляционного слоя.</li> <li>4) Разработка математической модели с двумя термоэлектродами, учитывающая процессы полимеризации и сушки в изоляционном слое.</li> <li>5) Проведение вычислительных экспериментов (исследование влияния внешней среды и внутренней структуры кабельной термопары на времена полимеризации его изоляционного слоя).</li> <li>6) Проведение сравнительного анализа полученных моделей.</li> <li>7) Разработка автоматизированной системы управления полимеризационной печи.</li> <li>8) Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.</li> <li>9) Социальная ответственность.</li> </ol> |
| <p><b>Перечень графического материала</b></p>                                                                            | <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Схема структурная АСУ полимеризационной печи.</li> <li>2) Схема функциональная автоматизированной системы управления полимеризационной печи.</li> <li>3) Схема принципиальная электрическая автоматизированной системы управления полимеризационной печи.</li> <li>4) Схема монтажная АСУ полимеризационной печи.</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p>                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <p><b>Раздел</b></p>                                                                                                     | <p><b>Консультант</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>                                                   | <p>Попова Светлана Николаевна, к.э.н., доцент</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <p>Социальная ответственность</p>                                                                                        | <p>Василевский Михаил Викторович, к.т.н., доцент</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <p>Теория и практика современного состояния исследований процессов теплопереноса при изготовлении кабельных термопар</p> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

**Задание выдал руководитель:**

| Должность | ФИО          | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-----------|--------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент    | Иванова Е.В. | к.т.н.                    |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО                     | Подпись | Дата |
|--------|-------------------------|---------|------|
| 5БМ5Д  | Яшутина Ольга Сергеевна |         |      |

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация 151 с., 33 рис., 15 табл., 112 источников, 2 приложения.

Ключевые слова: кабельная термопара, полимеризация, температура, контроль, кабельная продукция, сушка.

Цель работы – разработка прогностической модели для определения оптимальных условий изготовления кабельных термопар.

В работе был проведен аналитический литературный обзор по современному состоянию исследований процессов теплопереноса при изготовлении кабельных термопар; разработаны математические модели с одним и двумя термоэлектродами, учитывающие процессы полимеризации и сушки изоляционного слоя; выполнено исследование влияния внешней среды и внутренней структуры кабельной термопары на времена полимеризации его изоляционного слоя.

В процессе проектирования разработаны структурная, функциональная, принципиальная схемы и щит управления и автоматизации автоматизированной системы управления полимеризационной печи. Отображена оценка эффективности разработки. Рассмотрены вопросы, связанные с охраной труда на производстве.

Область применения: производство кабельной продукции.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Кабельная термопара; КТ

Автоматизированная система управления; АСУ

Термоэлектрический преобразователь сопротивления; ТПС

Термоэлектрод; ТЭ

Номинальная статическая характеристика; НСХ

Термоэлектрический преобразователь; ТЭП

Исполнительный механизм; ИМ

Автоматизированное рабочее место; АРМ

Чрезвычайная ситуация; ЧС

## Оглавление

|                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                                                                                  | 13 |
| 1 Теория и практика современного состояния исследований процессов теплопереноса при изготовлении кабельных термопар.....                       | 16 |
| 1.1 Важность измерения температуры в различных отраслях промышленности.....                                                                    | 16 |
| 1.2 Краткий обзор современных методов измерения температуры.....                                                                               | 18 |
| 1.3 Основные проблемы производства и изготовления кабельных термопар                                                                           | 23 |
| 1.4 Теоретические основы изготовления кабельных термопар.....                                                                                  | 25 |
| 2 Моделирование теплофизических и физико–химических процессов, протекающих при изготовлении кабельных термопар .....                           | 34 |
| 2.1 Физическая постановка .....                                                                                                                | 34 |
| 2.2 Математическая модель .....                                                                                                                | 35 |
| 2.3 Методы решения .....                                                                                                                       | 38 |
| 2.4 Решение тестовых задач .....                                                                                                               | 38 |
| 2.4.1 Одномерный теплоперенос в плоской двухслойной бесконечной пластине .....                                                                 | 38 |
| 2.4.2 Двумерный теплоперенос в однородной пластине .....                                                                                       | 42 |
| 2.4.3 Двумерный теплоперенос в неоднородной пластине с включением .....                                                                        | 44 |
| 2.4.4 Двумерный теплоперенос в однородной пластине с химической реакцией в материале (термическое разложение) и с излучением на границах ..... | 47 |
| 2.4.5 Тестовой расчет теплопереноса при равенности теплофизических характеристик термоэлектродов.....                                          | 50 |

|                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3 Результаты исследований моделирования процессов тепломассопереноса, в условиях интенсивных физико-химических полимеризация и фазовых превращениях ..... | 52 |
| 3.1 Влияние условий теплообмена на характеристики полимеризации при изготовлении кабельных термопар .....                                                 | 52 |
| 3.2 Влияние лучистого теплообмена на условия изготовления кабельных термопар .....                                                                        | 59 |
| 3.3 Влияние теплофизических характеристик термоэлектродов на условия изготовления кабельных термопар .....                                                | 60 |
| 3.4 Влияние возможного наличия влажности в изоляционном слое на условия изготовления кабельных термопар .....                                             | 66 |
| 3.5 Влияние различных математических моделей на прогностический потенциал времени полимеризации при изготовлении кабельных термопар .....                 | 67 |
| 4 Разработка автоматизированной системы управления полимеризационной печи .....                                                                           | 69 |
| 4.1 Выбор структуры системы автоматизированного управления полимеризационной печи .....                                                                   | 69 |
| 4.2 Проектирование функциональной схемы автоматизированной системы управления полимеризационной печи .....                                                | 70 |
| 4.3 Выбор технических средств АСУ полимеризационной печи .....                                                                                            | 73 |
| 4.3.1 Выбор датчика температуры .....                                                                                                                     | 73 |
| 4.3.2 Выбор микропроцессорного контроллера .....                                                                                                          | 78 |
| 4.3.3 Выбор пусковой аппаратуры .....                                                                                                                     | 79 |
| 4.3.4 Выбор исполнительного механизма .....                                                                                                               | 80 |
| 4.4 Проектирование принципиальной схемы АСУ полимеризационной печи .....                                                                                  | 83 |
| 4.5 Проектирование монтажной схемы АСУ полимеризационной печи .....                                                                                       | 85 |
| 4.6 Выбор проводов, кабелей и защитных труб .....                                                                                                         | 89 |
| 5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение...                                                                                      | 89 |

|                                                                                                                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1 Предпроектный анализ .....                                                                                                                                                                                   | 90  |
| 5.2 Календарный план-график выполнения работ.....                                                                                                                                                                | 92  |
| 5.3 Бюджет научного проекта .....                                                                                                                                                                                | 95  |
| 5.4 Критерий эффективности .....                                                                                                                                                                                 | 97  |
| 6 Социальная ответственность .....                                                                                                                                                                               | 100 |
| 6.1 Техногенная безопасность труда .....                                                                                                                                                                         | 100 |
| 6.1.1 Опасность поражения электрическим током .....                                                                                                                                                              | 100 |
| 6.1.2 Опасность механического травмирования .....                                                                                                                                                                | 101 |
| 6.1.3 Метеорологические условия работы в помещениях .....                                                                                                                                                        | 102 |
| 6.1.4 Производственное освещение .....                                                                                                                                                                           | 104 |
| 6.2 Физиологические и психофизиологические показатели.....                                                                                                                                                       | 105 |
| 6.2.1 Психологические показатели.....                                                                                                                                                                            | 105 |
| 6.2.2 Социально-психологические требования .....                                                                                                                                                                 | 105 |
| 6.3 Вибро–акустические вредные факторы .....                                                                                                                                                                     | 107 |
| 6.4 Электробезопасность .....                                                                                                                                                                                    | 107 |
| 6.4.1 Заземление .....                                                                                                                                                                                           | 108 |
| 6.5 Экологическая безопасность.....                                                                                                                                                                              | 108 |
| 6.5.1 Анализ влияния кабельного производства на окружающую среду.....                                                                                                                                            | 108 |
| 6.5.2 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды .....                                                                                                                                                   | 109 |
| 6.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях (ЧС).....                                                                                                                                                              | 109 |
| 6.6.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при<br>проведении моделирования. Обоснование мероприятий по предотвращению<br>ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС ..... | 109 |
| 6.7 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....                                                                                                                                            | 110 |
| Заключение .....                                                                                                                                                                                                 | 112 |
| Список публикаций.....                                                                                                                                                                                           | 113 |
| Список использованных источников .....                                                                                                                                                                           | 114 |

|                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Приложение А Заказная спецификация средств автоматизации .....                                                                   | 126 |
| Приложение Б Development of prognostic model for determination of optimum manufacturing conditions for cable thermocouples ..... | 129 |

|                       |                     |
|-----------------------|---------------------|
| Графический материал: | На отдельных листах |
|-----------------------|---------------------|

ФЮРА.421000.007 С1 Структурная схема автоматизированной системы  
управления полимеризационной печи

ФЮРА.421000.007 С2 Функциональная схема автоматизированной системы  
управления полимеризационной печи

ФЮРА.421000.007 Э3 Схема принципиальная электрическая

ФЮРА.421000.007 С4 Схема монтажная шкафа и внешних проводок

## ВВЕДЕНИЕ

Целью работы является разработка основных элементов математической базы, обеспечивающей адекватное моделирование процессов теплопереноса, протекающих совместно в условиях интенсивного радиационно-конвективного теплообмена при изготовлении кабельных термопар.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Проведение аналитического литературного обзора по современному состоянию исследований процессов теплопереноса при изготовлении кабельных термопар.
2. Разработка математической модели с одним электродом и учитывающая процесс полимеризации изоляционного слоя.
3. Разработка математической модели с двумя электродами и учитывающая процесс полимеризации изоляционного слоя.
4. Разработка математической модели с двумя электродами и учитывающая процессы полимеризации и сушки в изоляционном слое.
5. Проведение вычислительных экспериментов (исследование влияния внешней среды и внутренней структуры кабельной термопары на времена полимеризации его изоляционного слоя).
6. Проведение сравнительного анализа полученных моделей.
7. Разработка автоматизированной системы управления полимеризационной печи.

Научная новизна работы. Впервые поставлена и решена группа задач математического моделирования комплекса физико-химических превращениях (полимеризация) и фазовых (испарение воды), протекающих в кабельных термопарах, учитывающих двумерный нестационарный сопряженный, конвективный, кондуктивный и радиационный теплоперенос. Задачи не имеют аналогов по постановке и полученным результатам.

Практическая значимость. Разработанные математические и физические модели, алгоритмы численного решения задач теплопереноса могут быть использованы для анализа качества изоляционного слоя кабельной термопары и повышения энергоэффективности процессов сушки и полимеризации при их изготовлении. Представленные в работе исследования позволяют существенно повысить ресурсоэффективность (время, энергия, материал и т.д.) рассматриваемых процессов на производстве кабельных термопар.

В первой главе отражается современное состояние теоретических и экспериментальных исследований современного состояния исследований процессов теплопереноса при изготовлении кабельных термопар. Выполнен обзор опубликованных экспериментальных и теоретических работ по процессам полимеризации и сушки, которые можно использовать при построении моделей основных физико-химических процессов. Установлено отсутствие результатов основных элементов математической базы, обеспечивающей адекватное моделирование процессов теплопереноса при изготовлении кабельных термопар.

Во второй главе представлена постановка задачи нестационарного сопряженного кондуктивного, конвективного и радиационного теплопереноса, позволяющая выполнять численные исследования процессов, протекающих в процессе изготовления кабельных термопар. Приведены результаты численного решения тестовых задач для верификации выбранных численных методов и используемого алгоритма решения основной задачи.

В третьей главе описаны исследования моделирования процессов тепломассопереноса, в условиях интенсивных физико-химических полимеризация и фазовых превращениях. Приведены основные результаты численных исследований, в частности, влияние условий теплообмена, лучистой составляющей теплообмена, теплофизических характеристик термоэлектродов, возможного наличия влажности в изоляционном слое на условия изготовления кабельных термопар. Описаны основные

рекомендации для прогностической оценки процессов полимеризации при известных параметрах работы полимеризационной печи.

В четвертой главе разработана автоматизированная система управления полимеризационной печи, позволяющая осуществлять контроль и управления температурой в процессе полимеризации кабельного изделия. Представлено описание структурной, функциональной, принципиальной и монтажной схем, а также выбор технических средств АСУ.

В пятой главе рассмотрено экономическое обоснование разработанного проекта, в результате которого был составлен календарный график-план выполнения и смета затрат технического проекта, а также представлен критерий эффективности проекта.

В шестой главе выполнен анализ наличия опасных и вредных факторов, а также их воздействие на исследователя и рабочий персонал и предложены меры по снижению данного воздействия.

В заключении подведены основные итоги теоретических и экспериментальных исследований, а также сформулированы соответствующие выводы.

# 1 ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КАБЕЛЬНЫХ ТЕРМОПАР

## 1.1 Важность измерения температуры в различных отраслях промышленности

Одним из важнейших контролируемых параметров технологических процессов в химических [1], нефтехимических [2], энергетических [3], топливных, пищевой и других отраслях промышленности [4] является температура. Последняя является наиболее информационной характеристикой, определяющей всю физику технологического процесса. Она обладает некоторыми принципиальными особенностями, что обуславливает необходимость применения большого количества методов и технических средств для ее измерения. Температура — это величина, которая характеризует тепловое состояние тела [5]. Из её определения следует сделать вывод о том, что судить о температуре можно по изменению других физических свойств тел (давления, объема, термоЭДС, электрического сопротивления и т.д.), то есть она не может быть измерена непосредственно. Температурные измерения используются в системах мониторинга и контроля оборудования, а также качества протекания технологических процессов на различных промышленных предприятиях [6].

В пищевой промышленности от температуры зависят не только основные потребительские параметры, такие как цвет, вид, вкус, но и производственные параметры (сохранность, время изготовления и др.), а также объемы готовой продукции. Технологические процессы пищевой промышленности (копчение, сушка и др.) требовательно относятся к контролю температуры поверхности обрабатываемого сырья и общей температуры в термокамере. Требования к точному контролю температуры поверхности при высокотемпературной обработке сырья вызваны

недопущением сильного перегрева поверхности продукции, так как это приводит к получению эффекта «корочки». Последний в свою очередь значительно влияет на снижение качества органолептических свойств готовой продукции и на скорость технологического процесса [7]. Проблема точного определения температуры общей температуры в термокамере и поверхности сырья при его изготовлении является важной в пищевой промышленности.

В автомобильной промышленности при производстве важную роль играет возможность индивидуально регулировать и контролировать температуру процессов при разных технологических операциях [8]. Точное измерение параметров температуры позволяет снижать качество брака, повышать качество продукции и оптимизировать технологические процессы. Поддержание минимального диапазона температуры при изготовлении пластмассовых деталей облицовки автомобиля является необходимым требованием. Так как при сильно высокой температуре может произойти случайное сгорание деталей облицовки и, наоборот, при низких температурах произойдет образование складок. Поэтому для данного процесса важной задачей является непрерывный контроль температуры для регулирования и настройки излучателя [9]. Детали отделки интерьера автомобиля изготавливаются с помощью ламинирования. Такой процесс выполняется при определенной температуре, около 120 °С. При этом температура отделки оптимизируется и контролируется. Это все показывает актуальность проблемы измерения температуры в автомобильной промышленности.

В химической промышленности, конкретно в полимерной, температура продукта и производственного процесса выступает главной физической величиной. Этапы изготовления полимерной продукции включают в себя большое количество термических процессов [10]. При процессе термоформирования сырье нагревается до температуры, примерно равной 190°С, затем поддерживается термическим способом в однородном

состоянии [11]. Правильный и точный выбор температуры формования и высокая однородность поверхности приводят к высокому качеству готового изделия в целом. Процесс экструзии пластмасс в полимерной промышленности также находится без контроля и оптимизации температуры технологических процессов. Для получения однородности, постоянной толщины и глубины структуры на одном из этапов экструзии необходим равномерный и постоянный температурный профиль с отклонениями ниже 5 К [12]. Такое условие позволяет снизить количество брака при производстве и добиться постоянного высокого качества продукции.

В металлургической промышленности большое значение имеет температура на этапе переливания расплава из плавильной печи в литейные (транспортировочные) ковши [13]. В зависимости от температуры разливка расплава должна производиться за определенный промежуток времени. При избегании данного условия, будет происходить охлаждение расплава около 10 °С в минуту, и температура литья упадет ниже минимально допустимой, что не приемлемо в данном процессе.

## 1.2 Краткий обзор современных методов измерения температуры

Измерение температуры является наиболее востребованным, в промышленности и науке, видом измерения. Выбор методики измерения температуры зависит от диапазона измеряемых температур, требуемой точности, быстродействия, а также допустимой величины входного теплового сопротивления измерительного устройства (его входной теплоемкости).

Для измерения температуры жидких, твердых и газообразных сред существует огромное количество различных устройств, которые используют различные термометрические свойства и носят название термометр [14].

Самым распространенным видом термометров является жидкостной стеклянный термометр, принцип действия которого основан на том, что тело

изменяет свой объем при нагреве и на различии коэффициентов термометрического стекла и объемного расширения жидкости.

Все термометры по принципу действия можно разделить на несколько групп. Манометрические термометры, с диапазоном измерения 73–873 К, которые измеряют температуру по зависимости пара, жидкости или газа, находящиеся в замкнутом объеме, от изменения температуры. Термометры расширения, с диапазоном 13–973 К, принцип действия которого основан на изменении объема твердого тела или жидкости при изменении температуры. Термометры электрического сопротивления, с диапазоном 3–1023 К, в основе работы которых происходит преобразование изменения температуры в изменение электрического сопротивления полупроводников или проводников. Пирометры излучения, с диапазоном измерения 773–100273 К, принцип действия которых основан на интенсивности лучистой энергии, которую испускает нагретое тело. Термоэлектрические термометры, стандартные имеют диапазон 323–2073 К, в основе лежит зависимость электродвижущей силы от температуры спая проводников, состоящих из разных материалов. Термометры, которые основаны на электрофизических явлениях, с диапазоном измерения 1–1273 К (объемные резонансные термопреобразователи, термошумовые термоэлектрические преобразователи, ядерные резонансные термопреобразователи) [14].

Существуют два основных способа измерения температуры: бесконтактный и контактный.

Контактный способ основан на непосредственном контакте измерительного прибора с объектом исследования, в результате этого происходит тепловое равновесие объекта и преобразователя температуры. У такого способа имеется ряд недостатков. Температура измерительного прибора отличается от истинной температуры измеряемого тела. Температурное поле объекта исследования искажается при введении в него термоприемника. Всегда имеется верхний предел измерения температурного датчика, который возникает из-за свойств материалов, из которых

изготавливаются преобразователи. Контактный способ также не всегда применим, если измерение ведется в труднодоступных местах либо во вращающихся с большой скоростью объектах.

Газовый термометр постоянного объема состоит из порции газа (термометрического тела), который заключен в сосуд, соединенный с манометром с помощью трубки. Термометрический признак, обеспечивающий измерение температуры – давление газа при определенном фиксированном объеме. В момент вертикального перемещения левой трубки, в правой трубке уровень манометра доводится до опорной метки и производится измерение разности высот уровней измеряемой жидкости в манометре, тем самым достигается постоянство объема. При измерении температуры газовым термометром постоянного объема, происходит учет разных поправок (адсорбции газа, теплового расширения стекла термометра и др.), позволяющий достичь точности измерения до 0,001 K [14].

Газовые термометры имеют ряд преимуществ. Шкала газового термометра совпадает с абсолютной шкалой температур, измеряемая температура не зависит от природы используемого газа, при малых плотностях газа. На практике такие термометры используют для градуировки.

Жидкостной термометр самый используемый прибор для измерения температуры в быденной жизни. Принцип действия, которого, основан на изменении объема жидкости при изменении температуры. Распространенным типом жидкостного термометра является ртутно-стеклянный термометр. Термометрическим телом в таком термометре является ртуть, которая помещена в стеклянный баллон. Диапазон измерения ртутных термометров от -35 °C до нескольких сотен градусов. При измерении высоких температур (выше 573 K), для того чтобы препятствовать кипению ртути, в капилляр накачивают азот. Но за счет такого введения понижается нижняя граница измерения температуры до 214 K.

Спиртовой термометр является другим видом широко

распространённых жидкостных термометров. Диапазон измерения такого термометра от 265 К до 281 К, пентанового – от 73 К до 308 К. В качестве термометрического тела в жидкостном термометре невозможно применять воду. Это обусловлено тем, что при повышении температуры объем воды сначала существенно падает, а затем растет, тем самым нельзя использовать объем воды в качестве термометрического признака при измерении.

В настоящее время наиболее удобным типом термометра, стал термометр, в котором термометрический признак – электрический сигнал. Это термопары и термосопротивления (полупроводниковые и металлические).

Принцип действия металлического термометра основан на том, что при росте температуры происходит рост сопротивления металла. Для металлов эта зависимость близка к линейной при комнатной температуре. Электрическое сопротивление металлической проволоки, которая выступает термометрическим признаком, является термометрическим признаком. Чаще всего используется медная или платиновая проволоки, либо их сплавы. Диапазон измерения металлических термометров от 20 К до сотен градусов Цельсия. При измерении низких температур зависимость сопротивления становится нелинейной, тем самым термометр нуждается в калибровке.

Принцип действия полупроводникового термометра сопротивления основан на том, что с ростом температуры уменьшается сопротивление полупроводников. Чувствительность таких термометров гораздо выше чувствительности металлических термометров, так как температурный коэффициент сопротивления полупроводников значительно отличается от коэффициента металлов. Специально изготовленные такие термометры могут быть использованы при гелиевых температурах (несколько кельвин). Но в обычных полупроводниковых термосопротивлениях измерения при сильно низких температурах приведут к дефектам [14].

Бесконтактные методы для измерения температуры основываются на использовании энергии излучения нагретых тел [15]. Одним из видов

бесконтактного устройства для измерения температуры тел является пирометр. Его принцип действия основан на измерении мощности теплового излучения в диапазонах видимого света и инфракрасного излучения [14]. Еще одна разновидность бесконтактного устройства – тепловизор. Это средство измерения температуры, принцип действия которого основан на тепловом излучении объекта. Тепловизор позволяет получить тепловую картину некоторой области измерения. Пирометры и тепловизоры в основном имеют применение при измерении высоких температур от 1800 °С до 3000 °С, когда контактные средства измерения применять невозможно. Но несмотря на некоторые преимущества, бесконтактные датчики имеют и ряд недостатков – зависимость показаний от отражательных свойств измеряемой области, от расстояния до измеряемого объекта, от излучения, которое не попадает в поле зрения пирометра или тепловизора [16].

Контактные методы для измерения в основном используются в диапазоне низких и средних температур, при этом применяются термоэлектрические преобразователи (термопары) и термометры сопротивления. Термоэлектрический преобразователь сопротивления (ТПС) предназначен для измерения температуры в комплекте с автоматическими мостами или логометрами. Принцип действия ТПС основан на том, что полупроводники и проводники имеют свойство изменять свое сопротивление при изменении их температуры [14]. Термопары позволяют измерять более высокие температуры. Верхний диапазон измерения достигает 2300 К. Недостатки термоэлектрических преобразователей – низкий коэффициент полезного действия и высокая инерционность [17]. Самым распространенным контактным методом измерения температуры, особенно в промышленности, является метод измерения с помощью термоэлектрических преобразователей (ТЭП) [18], принцип действия которых, основан на эффекте Зеебека. Термопара – это датчик температуры, состоящий из двух соединённых между собой электропроводящих разнородных элементов, обычно металлических проводников, реже полупроводников [19].

Распространённость такого датчика обусловлена рядом преимуществ, по сравнению с другими методами измерения температуры. Термопары имеют такие преимущества, как широкий интервал измеряемых температур (от 23 К до 2773 К), это самый высокотемпературный контактный датчик, небольшие размеры, простота применения, прочность и надежность конструкции, высокая точность измерения, малая теплоемкость, дешевизна, также спай термопреобразователя может быть приведен в прямой контакт с объектом или заземлен [20].

По стандарту [21] выделяют 12 основных типов термопар. В настоящее время одним из самых распространенных типов термоэлектрических датчиков температуры являются кабельные термопары. Они применяются в очень широком диапазоне температур почти во всех отраслях промышленности. Кабельная термопара представляет собой металлическую гибкую трубку, с одной стороны которой расположены контакты для подключения к вольтметру. В этой трубке находятся термоэлектроды (одна пара, две или три), которые изолированы между собой по всей длине, уплотненной мелкодисперсной минеральной изоляцией и сварены на одном конце [13]. Использование кабельных термопар имеет ряд преимуществ перед обычными промышленными термопарами в жестком керамическом корпусе. Конструкция кабельной термопары определяет ее основное преимущество: гибкость и герметичность корпуса. Также возможно изготовление кабельных термопар большой длины. В отличие от промышленных жестких термопар, благодаря изоляции и тонкому корпусу, такие термопары отличаются намного меньшей тепловой инерционностью [12].

### 1.3 Основные проблемы производства и изготовления кабельных термопар

Термопары изготавливаются из термоэлектродной проволоки. Наиболее часто применяемые металлы и сплавы для изготовления

термоэлектродной проволоки: вольфрам, алюмель, хромель, константан, железо, платина, копель, медь, платина, платинородий и др. При выборе диаметра проволоки учитывается: диаметр канала, куда будет помещаться термопара, характер и тип изоляции, минимальный отвод тепла по термопаре. Термоэлектродную проволоку получают при технологическом процессе – протяжка. Протяжка осуществляется в несколько этапов. В зависимости от того, из какого материала сделана проволока, операция протяжка может осуществляться совместно с подогревом. После протяжки проволока подвергается дополнительной химической или термической обработке для улучшения свойств и удаления смазки. Термопарную проволоку, состоящую из сплавов хромель-алюмель и хромель-копель отжигают [22].

Кабельная термопара представляет собой металлическую гибкую трубку, внутри которой размещены одна или две пары термоэлектродов, расположенные параллельно друг другу и сварены со стороны рабочего торца между собой. Этап сварки рабочего спая считается очень сложным в технологии изготовления термопары. Чаще всего сварка осуществляется на технологических установках лазерной сварки в импульсном режиме и на специализированном сварочном агрегате. Процесс сварки производится внутри оболочки кабеля, за счет этого могут возникать технологические дефекты в сварочном шве, такие как непровы, свищи, микротрещины, утонения термоэлектродов. Такие дефекты приведут к быстрому и преждевременному разрушению рабочего спая. Пространство между термоэлектродов заполнено минеральной изоляцией. В качестве изоляции применяется окись алюминия или окись магния с чистотой не ниже 96%. Кабельные термопары производятся наружным диаметром 0,5–8 мм.

Надежная изоляция кабельной термопары позволяет навивать ее на цилиндр радиусом, равным пятикратному диаметру кабеля, без ухудшения технических характеристик термопары. Такая надежность обуславливается технологией изготовления термопарного кабеля. Из окиси магния или

алюминия изготавливают двухканальные бусы методом сухого прессования, в которые вставляют термоэлектроды, затем всю конструкцию помещают в трубу из нержавеющей стали, которая в процессе производства кабельной термопары вытягивается в оболочку необходимого диаметра. После этого сборку многократно протягивают через фильеры и помещают в полимеризационную печь для проведения отжига. В процессе отжига, при высоких температурах, помимо изготовления оболочки кабельной термопары и достижения монолитности изделия, в изоляционном слое происходят физико-химические превращения (полимеризация) и фазовые превращения (сушка изоляционного слоя) [22].

Исследование теплофизических, механических и термохимических характеристик изоляционных материалов кабельных изделий, а также процессов их изготовления рассматривается во многих научных трудах. Можно отметить работы отдельных ученых и научных коллективов, например, Осипова С.Ю. [23], Цаплина А.И. [24], Короткова В.Н. [25], Труфановой Н.М., Янкова В.И., Силуянова А.Ю., Сырчикова И.Л., Ковригина Л.А. [26–41], Леонова А.П., Кима В.С. [42–46], Куличихина С.Г. [47], Михайлова Ю.М. [48], Захватова А.С. [49], Халтуринского Н.А., Левина П.П., Худяева С.И., Штейнберга А.С., Шкадинского К.Г. [50–55] и других.

#### 1.4 Теоретические основы изготовления кабельных термопар

Технологические процессы изготовления изоляционного слоя кабельных термопар не проработаны теоретически, несмотря на многочисленные научные труды и значительный производственный опыт. Все это сказывается на безопасности процессов изготовления для персонала [56–58] и также снижает эффективность производства.

Качество кабельных термопар в большей степени определяется процессами полимеризации их изоляционного слоя [59]. Проведенные исследования термохимических характеристики процессов при

полимеризации полимерных материалов для изготовления кабельных изделий [60–66], показывают, что существенное влияние на качество готового изделий оказывает кинетика соответствующих химических реакций при изменении внешних условий. Выявлены температурные режимы, при которых реакции полимеризации протекают с минимальным и максимальным тепловыделением, а также потреблением энергии [61–62]. Установлены роли фотофизических и фотохимических процессов [62], которые протекают в полимерных материалах при их нагревании. Определены условия возгораний и стационарного горения смесей компонентов полимерных материалов в процессе перегрева изделий [60,61,63]. Также показаны масштабы влияния на характеристики полимеризации нехимических и химических источников тепловыделения [62]. Можно выделить результаты исследований кинетики химического реагирования при твердофазной деполимеризации [65] и постполимеризации [64]. Но следует отметить, что все проведенные исследования [60–66] не рассматривали влияние высокоинерционных нестационарных тепловых режимов на интегральные параметры полимеризации изоляционного слоя, что необходимо на практике.

Известно [67,68], что в качестве изоляционных слоев кабельных термопар могут применяться различные материалы, чаще всего это окись магния или алюминия.

Процесс фазовых превращений (сушка) играет важную роль, наравне с процессом полимеризацией, в процессе изготовления кабельных термопар. Основой теории сушки является закономерность переноса влаги и тепла во влажных материалах при их взаимодействии с горячими поверхностями, с нагретыми газами, а также в процессах облучения электромагнитными и тепловыми волнами при фазовых превращениях. В настоящее время сушка неразрывно связана с основными закономерностями тепло- и массообмена. Процесс сушки является технологическим процессом, при котором меняются технологические, биологические, структурно-механические свойства

материала. В ходе сушки происходит частичное удаление воды путем испарения и изменение форм связи влаги с материалом [69].

Влажные материалы, которые подверглись периодическому воздействию влаги и тепла или термической обработке, изменяют свои физические свойства. Такой процесс происходит вследствие молекулярного характера связи поглощений жидкости с веществом тела. В ходе процесса удаления жидкости из тела нарушается связь ее с телом, на что затрачивается энергия. При сушке с помощью нагретого воздуха с определёнными параметрами ( $t$ ,  $\phi$ ,  $v$ ) невозможно удалить всю влагу. Процесс происходит только до равновесной влажности материала, соответствующей данным параметрам воздуха. Поэтому вводят понятие удаляемого влагосодержания  $W_y$ . Это влагосодержание материала  $W$  с вычетом равновесного влагосодержания  $W_y$  [69].

Под кинетикой сушки понимают изменение средней температуры тела и среднего влагосодержания с определенным временем. Такие закономерности кинетики позволяют рассчитывать расход тепла на сушку и количество испаренной жидкости из материала. Механизм влаго- и теплопереноса внутри влажных тел очень сложный и определяется характером связи влажного тела и влаги, именно поэтому кинетика процесса сушки может быть определена физико-химическими свойствами сохнущего материала. Определение полей температуры  $t(x, y, z, \tau)$  и влагосодержания  $u(x, y, z, \tau)$  связано с решением системы дифференциальных уравнений тепло-массопереноса при определенных граничных условиях, которые отображают режим и способ сушки. Такая система уравнений является системой нелинейных дифференциальных уравнений [70].

Процесс сушки делят на два периода: первый период, при котором постоянная температура тела, убыль влагосодержания происходит по линейному закону, второй период, в котором температура тела растет, а убыль влагосодержания (скорость сушки) непрерывно уменьшается. Такие закономерности применимы для всех тел, при мягких режимах сушки. Под

мягким режимом понимается такой режим, при котором начальное влагосодержание больше критического влагосодержания. Для технологии процесса сушки большое значение имеет температура материала. Если испарение происходит на поверхности материала, но и внутри его (критерий испарения  $\varepsilon > 0$ ), тогда температура поверхности выше, чем центральных слоев. При  $\varepsilon > 0$  внутри тела есть температурный градиент. Температура одинакова по всему сечению материала при  $\varepsilon = 0$  [69].

В настоящее время выполнен ряд работ по численному решению системы дифференциальных уравнений, при учете изменения температуры и коэффициентов переноса от влагосодержания. В работе [72] показано, что поля температуры  $t$  и влагосодержания  $u$  влажных материалов при переменных коэффициентах переноса имеют вид, как и поля  $u$ ,  $t$  которые получены при решении линейной системы дифференциальных уравнений тепло- и влагопереноса. Вследствие этого, для качественного анализа механизма процесса сушки могут быть использованы решения системы линейных уравнений переноса.

Целесообразно выполнить моделирование теплового состояния типичных кабельных изделий, как сложных многослойных систем, в процессе их полимеризации [73–79], для выбора оптимальных по качеству изделий и энергозатратам процессов рабочих сред. Тепловой режим подбирается таким образом, чтобы полимеризация завершалась по всей толщине изоляционного слоя изделия. Кроме того, интенсивность нагрева выбирается исходя из условия, чтобы температура поверхности изоляции была меньше температуры начала термического разложения материала. Энергетическая эффективность технологического процесса зависит от точности прогностического моделирования нестационарных температурных полей изоляционных слоев в процессе их полимеризации [80].

На сегодняшний день рассмотрены различные математические модели изготовления кабельной продукции. В [81] разработана прогностическая модель для теоретического анализа зависимости параметров процесса

полимеризации при изготовлении кабельной продукции от погрешностей определения термохимических характеристик изоляционных материалов. В работе [82] разработанная прогностическая модель позволяет проводить численную оценку влияния теплофизических (плотность, теплопроводность) и термохимических характеристик материалов изоляционного слоя на параметры полимеризации в процессе изготовления типичных кабельных изделий. Установлено, что незначительное отклонение таких характеристик (до 15%) приводит к достаточно значимым отклонениям интегральных характеристик процесса полимеризации, что сказывается на качестве готового изделия в худшую сторону. Также выполнено численное моделирование комплекса процессов полимеризации и тепломассопереноса, протекающих совместно при вулканизации кабельного изделия [83]. Проанализировано влияние конвективного теплообмена с окружающей средой, конфигурации кабеля и эффект полимеризации на условия его прогрева.

Представленные модели не учитывают реальную геометрию кабельного изделия. Последнее обуславливается тем, что в предложенных моделях в области решения задачи начало координат начинается с жилы, а не с центра кабеля. Теплофизические характеристики жил кабельного изделия существенно отличаются. Соответственно характеристики теплопереноса в частях кабельного изделия находящихся по разные стороны оси симметрии последнего также существенно различны. В результате происходит смещение центра симметрии температурной кривой относительно оси цилиндра.

Также необходимо выделить работы, которые посвящены моделированию процессов теплопроводности в отверждаемых оболочках из полимерных материалов [80]. Выявлено [80], что на этапе полимеризации возникает наибольший градиент температуры в изоляционном слое изделия. Такой перепад температур может достигать 38–44%. В [76] показано, что основная сложность оптимизации температурного режима изготовления

изоляции возникает при необходимости решения сложных краевых задач нестационарной теплопроводности.

Видно [76,78], что степень отверждения изоляционного материала при фазовом переходе помимо параметров состояния, также существенно зависит от параметров диффузионного переноса. Предложено [76] использовать дифференциальное уравнение параболического типа для описания процессов диффузии, которое целесообразно решать в сопряженной постановке с уравнением теплопроводности.

Необходимо отметить, что в настоящее время имеются данные о кинетических параметрах химического реагирования для процессов полимеризации полимерных материалов.

Также известна кинетическая модель [79] химического реагирования в изоляционном слое кабельного изделия при его перегреве. В постановке задачи [79] учтены процессы массопереноса газовой фазы, за счет диффузии, через поры приповерхностного слоя кабельного изделия. Подход, описанный в данной работе, редко применяется на практике, так как он требует больших временных и материальных ресурсов. Поэтому результаты исследования [79] затруднительно использовать при поиске энергоэффективных режимов полимеризации изоляционных материалов.

Неоднократно предпринимались попытки теоретического решения задач полимеризации. Например, можно выделить несколько упрощенную математическую модель нагрева бесконечной двухслойной пластины [80], которая позволяет проводить аналитические расчеты нестационарных температурных полей, с учетом различных вариантов протекания процесса полимеризации внешнего изоляционного покрытия пластины в процессе нагрева. Но при этом возникают вопросы о правомерности отступления от реальной геометрии изоляционных слоев при моделировании процессов полимеризации.

Как видно, при нагреве обрабатываемых изоляционных материалов, в математических моделях теплопереноса важно учитывать существенные

изменения во времени температуры окружающей среды и коэффициента теплоотдачи (целесообразно решение задачи сопряженного теплообмена), так как все это может привести к погрешностям достаточно значительным в расчетах. Но чаще всего используют упрощенные постановки с постоянными значениями температуры окружающей среды и коэффициента теплоотдачи.

Можно отметить, что использование одномерных приближений допустимо при анализе только однородных стационарных изоляционных слоев и их равномерном прогреве. В реальной практике практически невозможно обеспечить такие условия. Именно поэтому очень актуальны пространственные и плоские постановки задач теплопереноса. В попытке исследования [45] установлено, что предотвратить нарушение технологической монолитности на стадии отверждения можно за счет уменьшения скорости намотки и увеличения температуры отверждения.

Такой монолитности трудно добиться при полимеризации многослойных (многожильных) кабельных изделий. В [82] рассмотрен перенос теплоты в многослойном кабеле. Задача была решена с помощью операционного метода. Выделено [82], что целесообразно выполнять численную оценку влияния термохимических и термофизических характеристик изоляционных слоёв на условия их полимеризации.

При анализе теоретических работ, которые были рассмотрены, можно сказать, что для крупных изделий, которые нагреваются в полимеризационных камерах при температурах до 400 °С, обоснованно использование постановок с декартовыми системами координат при моделировании. Но при анализе закономерностей процесса изготовления кабельных изделий, в том числе кабельных термопар, целесообразно будет использование цилиндрических систем координат, для увеличения достоверности прогноза. Кроме этого, можно сделать предположение что теплообмен излучением и тепловой эффект полимеризации при высоких температурах играют большую роль в формировании тепловых режимов изделий.

Также необходимо подчеркнуть, что в общем случае кабельные термопары, представляют собой многослойные цилиндры, у которых один изоляционный слой.

Важно отметить, что на многих производствах кабельной продукции, параметры («уставки») технологических процессов изготовления подбираются опытным путем [84,85]. Как правило, это занимает достаточно длительное время, и эти процессы сопровождаются большим количеством производственного брака. Для того чтобы провести исследования макроскопических закономерностей процессов, которые протекают в слое изоляции, необходимо дорогостоящее оборудование. Поэтому самым целесообразным подходом к решению вопросов исследования материалов кабельных изделий является численное моделирование.

Для обеспечения процессов полимеризации, окончательного обезвоживания и снятия механически конструктивных напряжений, необходимо применение специальных высокотемпературных установок (полимеризационные печи). Конструктивные характеристики последних существенно зависят от внутрикамерных условий, а также от геометрических и структурных параметров кабельной термопары. Наиболее важными характеристиками такой печи является температура нагрева и время выдержки КТ, а также конструктивные характеристики, обеспечивающие необходимый режим конвективного и радиационного теплообмена. Для оптимального расчета вышеприведенных характеристик полимеризационной печи, необходимо максимально точно моделировать процессы тепломассопереноса, протекающие в КТ, при их нагреве.

Проведение большого количества экспериментальных исследований процессов тепломассопереноса, протекающих в полимеризационной печи, затруднительно (можно сказать даже невозможно). Последнее обусловлено большим разнообразием сочетаний термоэлектродов (из различных материалов), размеров КТ и условий теплообмена. Соответственно можно

сказать, что применение аппарата математического моделирования является наиболее приемлемым.

На настоящее время практически не разработаны физические и математические теории, описывающие процессы тепломассопереноса, протекающих совместно в условиях интенсивных физико-химических превращениях (полимеризация) и фазовых (испарение воды), при радиационно-конвективном излучении. Проведение математического моделирования осложняется тем, что КТ является существенно неоднородной и анизотропной по своей структуре. Соответственно характеристики тепломассопереноса также будут существенно зависеть от структуры КТ. Скорей всего именно по этой причине до сих пор не разработано «адекватной» физической теории и обеспечивающей ее математической базы в процессах тепломассопереноса при изготовлении КТ.

Подводя итог можно сказать, что решение задачи расчета характеристик и условий, обеспечивающих высокое качество кабельных термопар, является актуальной и нерешенной до настоящего времени задачей. Поэтому целью исследования является разработка основных элементов математической базы, обеспечивающей адекватное моделирование процессов теплопереноса, протекающих совместно в условиях интенсивного радиационно-конвективного теплообмена при изготовлении кабельных термопар.

## 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ФИЗИКО–ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КАБЕЛЬНЫХ ТЕРМОПАР

### 2.1 Физическая постановка

При постановке задачи предполагалось (рис. 2.1.1), что в начальный момент времени кабельная термопара, с начальной температурой  $T_0$ , попадает в высокотемпературную газовую среду (внутрикамерное пространство полимеризационной печи). Под воздействием интенсивного радиационно-конвективного теплообмена происходит ее нагревание. В результате инициируется процесс обезвоживания изоляционного слоя кабельной термопары. При дальнейшем нагреве начинается процесс полимеризации магниевой изоляции внутри КТ. В момент времени, когда средний по объему параметр полимеризации ( $\eta$ ) становится равным  $\sim 1$  предполагается, что процесс термической обработки кабельной термопары прекращается, соответственно заканчивается тепловое воздействие.

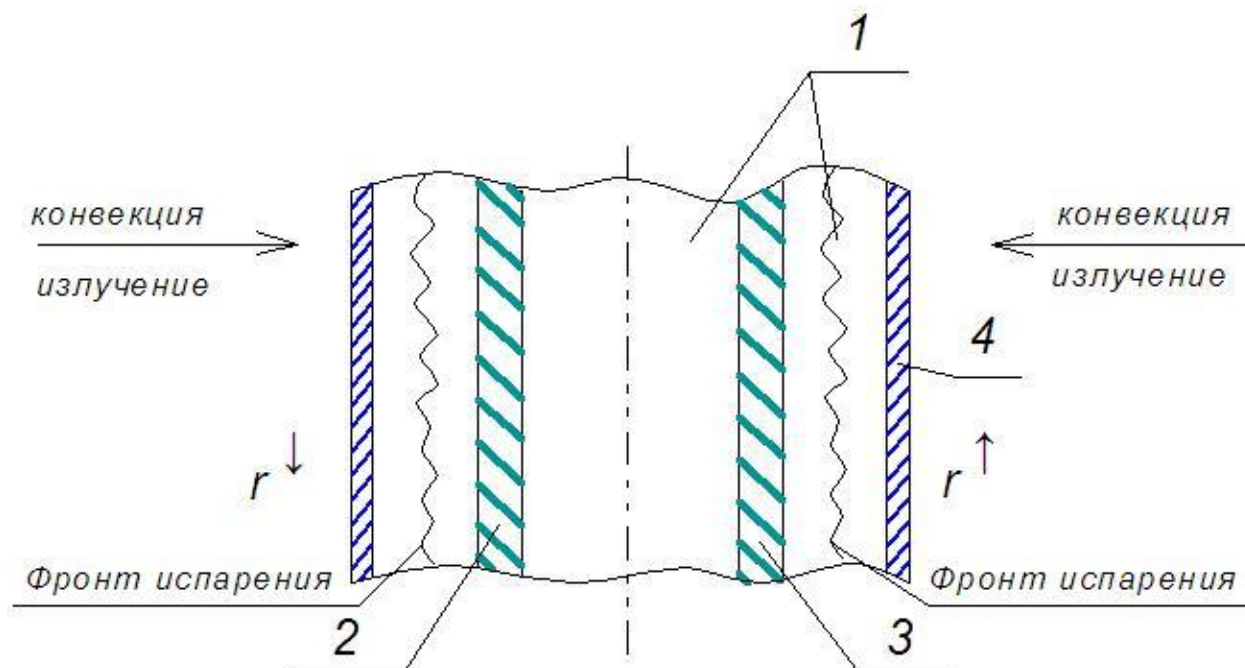


Рисунок 2.1.1 – Схема области решения задачи: 1 – порошок изоляции (MgO); 2, 3 – термоэлектроды; 4 – оболочка кабельной термопары

## 2.2 Математическая модель

При математическом моделировании рассматривалась система, приведенная на рисунке 2.1.1.

Считалось, что кабельная термопара состоит из порошка изоляции (MgO) (1), термоэлектродов (2,3) и оболочки (4).

При математической постановке предполагалось КТ, представляет собой цилиндр с включениями из термоэлектродов (ТЭ), выполненных из разных металлов. При этом стоит отметить, что ТЭ расположены симметрично относительно оси термопары. Выбор цилиндрической системы координат при моделировании обусловлен тем, что кабельные изделия чаще всего представляют собой многослойные вытянутые вдоль оси симметрии длинные цилиндры [86]. Рассматривалась осесимметричная постановка задачи (рис. 2.1.1).

Математические модели, соответствующие сформулированной выше (см. п. 2.1) физической постановке, состоят из системы нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных.

Для модели №1 (математическая модель с одним электродом, учитывающая процесс полимеризации изоляционного слоя):

– уравнение энергии для изоляции:

$$\rho_1 C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} - Q_p (1 - \eta) \cdot \exp \left( -\frac{E}{RT} \right) \quad (2.2.1)$$

$$t > 0; r_2 < r < r_3;$$

– уравнение энергии для термоэлектрода:

$$\rho_2 C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\lambda_2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \quad (2.2.2)$$

$$t > 0; r_1 < r < r_2;$$

– уравнение энергии для оболочки:

$$\rho_3 C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_4}{\partial r} \right) + \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \quad (2.2.3)$$

$$t > 0; r_3 < r < r_4$$

Для модели №2 (модель с двумя электродами, учитывающая процесс полимеризации изоляционного слоя):

– уравнение энергии для изоляции:

$$\rho_1 C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \sum_{\uparrow}^{\downarrow} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \lambda_1 \sum_{\uparrow}^{\downarrow} \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} - Q_p (1 - \eta) \cdot \exp \left( -\frac{E}{RT} \right) \quad (2.2.4)$$

$$t > 0; r_1^{\downarrow} < r < r_2^{\uparrow}; 0^{\downarrow} < r < r_3^{\uparrow}$$

– уравнение энергии для термоэлектродов:

$$\rho_2 C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\lambda_2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \quad (2.2.5)$$

$$t > 0; r_2^{\downarrow} < r < r_3^{\uparrow};$$

$$\rho_3 C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \frac{\lambda_3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_3}{\partial r} \right) + \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \quad (2.2.6)$$

$$t > 0; r_2^{\downarrow} < r < r_3^{\uparrow}$$

– уравнение энергии для оболочки:

$$\rho_4 C_4 \frac{\partial T_4}{\partial t} = \lambda_4 \sum_{\uparrow}^{\downarrow} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_4}{\partial r} \right) + \lambda_4 \sum_{\uparrow}^{\downarrow} \frac{\partial^2 T_4}{\partial z^2} \quad (2.2.7)$$

$$t > 0; r_0^{\downarrow} < r < r_1^{\uparrow}$$

Для модели №3 (модель с двумя электродами, учитывающая процессы полимеризации и сушки изоляционного слоя):

– уравнение энергии для изоляции:

$$\rho_1 C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \sum_{\uparrow}^{\downarrow} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \lambda_1 \sum_{\uparrow}^{\downarrow} \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} - Q_p (1 - \eta) \cdot \exp \left( -\frac{E}{RT} \right) - \frac{Q_v \cdot W_v}{h_s} \cdot \delta(r_v, z_v) \quad (2.2.8)$$

$$t > 0; r_1^{\downarrow} < r < r_2^{\uparrow}; 0^{\downarrow} < r < r_3^{\uparrow}$$

– уравнение энергии для термоэлектродов:

$$\rho_2 C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\lambda_2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \quad (2.2.9)$$

$$t > 0; r_2^{\downarrow} < r < r_3^{\uparrow};$$

$$\rho_3 C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \frac{\lambda_3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_3}{\partial r} \right) + \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \quad (2.2.10)$$

$$t > 0; r_2^{\downarrow} < r < r_3^{\uparrow}$$

– уравнение энергии для оболочки:

$$\rho_4 C_4 \frac{\partial T_4}{\partial t} = \lambda_4 \sum_{\uparrow}^{\downarrow} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_4}{\partial r} \right) + \lambda_4 \sum_{\uparrow}^{\downarrow} \frac{\partial^2 T_4}{\partial z^2} \quad (2.2.11)$$

$$t > 0; r_0^\downarrow < r < r_1^\uparrow$$

Где  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $C$  – теплоемкость, Дж/(кг\*К);  $T$  – температура, К;  $t$  – время, с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м\*К);  $r, z$  – координаты цилиндрической системы, м;  $\eta$  – параметр полимеризации;  $Q_p$  – теплота химической реакции полимеризации, Дж/кг;  $E$  – энергия активации химической реакции, Дж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль\*К); индексы «1», «2», «3», «4» соответствуют спаю термопары, изоляции, оболочке.

Массовая скорость испарения вычислялась из выражения [87]:

$$W_{исп} = W_0 \cdot \exp\left(\frac{Q_{исп} \cdot \mu \cdot (T_1 - T_3)}{R \cdot T_3 \cdot T_1}\right) \quad (2.2.12)$$

Где:  $T_1$  – температура на границе испарения, К;  $T_3$  – температура жидкости, соответствующая точке замерзания, К;  $W_0$  – скорость испарения при температуре  $T_3$ ,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$ ;  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ .

Теплофизические свойства влажной и «обезвоженной» части изоляционного слоя рассчитывались с учетом объемных долей компонентов [88]:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \varphi_3 \lambda_3 + \varphi_4 \lambda_4 & C_{p1} &= \varphi_3 C_{p3} + \varphi_4 C_{p4} & \rho_1 &= \varphi_3 \rho_3 + \varphi_4 \rho_4 \\ \lambda_2 &= \varphi_3 \lambda_3 + \varphi_5 \lambda_5 + \varphi_6 \lambda_6 & C_{p2} &= \varphi_3 C_{p3} + \varphi_5 C_{p5} + \varphi_6 C_{p6} & \rho_2 &= \varphi_3 \rho_3 + \varphi_5 \rho_5 + \varphi_6 \rho_6 \end{aligned}$$

Где  $\varphi$  – объемная доля соответствующего компонента изоляционного слоя: 3 – вода; 4 – оксид магния, температура которого меньше  $T_{np}$ ; 5 – оксид магния, температура которого больше  $T_{np}$ ; 6 – воздух.

Стоит отметить, что симметрично, относительно оси термопары, расположены термоэлектроды с различными теплофизическими характеристиками (теплопроводность  $\lambda$ , теплоемкость  $C$ , плотность  $\rho$ ). Соответственно, можно обосновано предположить, что расположение теплового центра симметрии будет отличаться от локализации геометрического центра термопары.

## 2.3 Методы решения

Задача математической физики решалась методом конечных разностей с применением четырехточечного неявного разностного шаблона [89]. Численная реализация многомерных уравнений проводилась с применением локально-одномерного метода А.А. Самарского [90].

Для решения задачи с такой сложной геометрией был разработан алгоритм, учитывающий отличие характеристик теплопереноса, относительно центра симметрии термопары. Он основан на квази-аддитивном сопряжении двух систем уравнений, учитывающих теплоперенос в противоположных направлениях от центра термопары.

## 2.4 Решение тестовых задач

Для тестирования выбранных численных методов и сформулированного алгоритма решения основной задачи нестационарного конвективного, кондуктивного и радиационного теплопереноса (п. 2.1) была решена группа тестовых задач [89].

### 2.4.1 Одномерный теплоперенос в плоской двухслойной бесконечной пластине

Рассматривался процесс теплопереноса в теле, представляющем собой совокупность двух пластин с различными теплофизическими характеристиками (рис. 2.4.1.1).

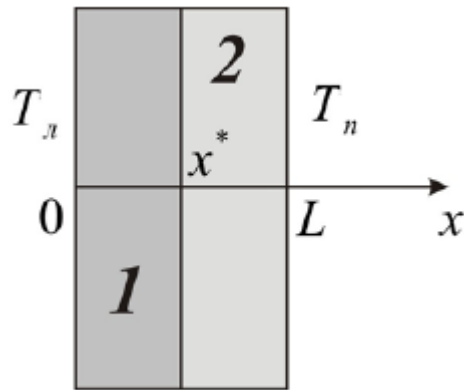


Рисунок 2.4.1.1 – Геометрия задачи

Математическая постановка задачи будет иметь вид:

$$\begin{cases} \rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, & 0 < x < x^*; \\ \rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, & x^* < x < L; \end{cases}$$

Начальные и граничные условия можно записать следующим образом:

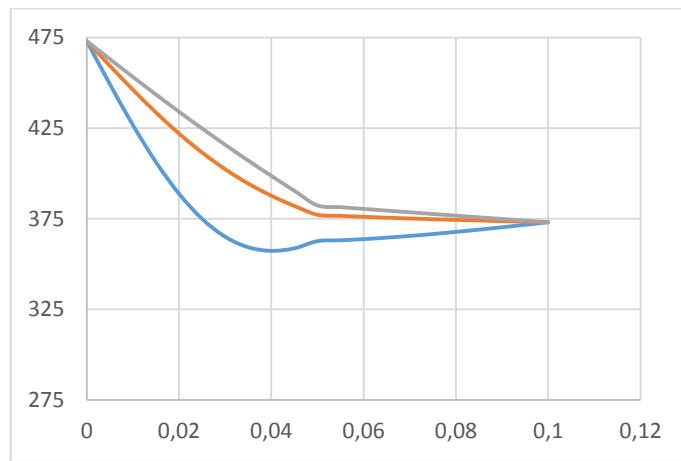
$$t = 0: T = T_0, 0 \leq x \leq L;$$

$$x = 0: T = T_n, t > 0;$$

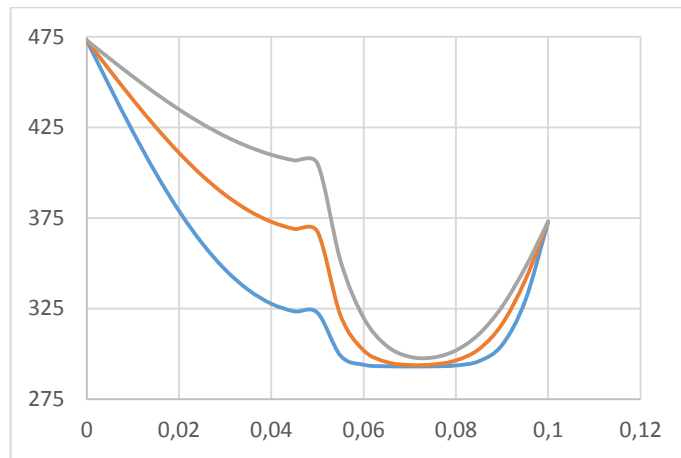
$$x = L: T = T_n, t > 0;$$

$$\begin{cases} T_1(t, x^*) = T_2(t, x^*), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=x^*} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=x^*}. \end{cases}$$

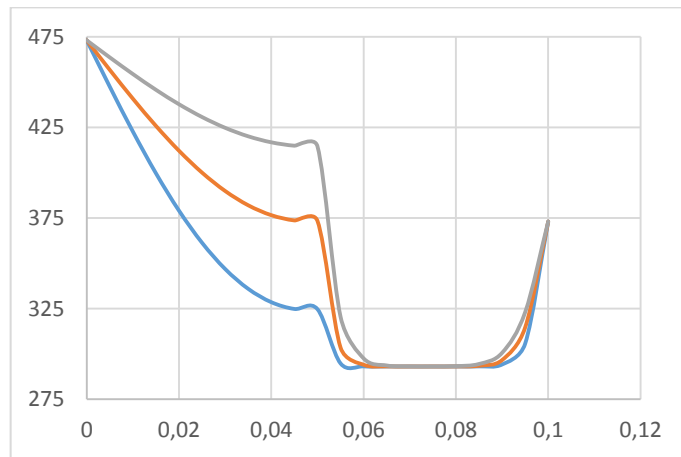
Рассматривалось температурное поле в составной пластине через 30, 60 и 100 секунд. Толщина пластины  $L = 0.1$  м. Начальная температура  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ . На границе  $x = 0$  поддерживается постоянная температура  $T_R = 200^\circ\text{C}$ , а на границе  $x = L$   $T_L = 100^\circ\text{C}$ .



*a)*

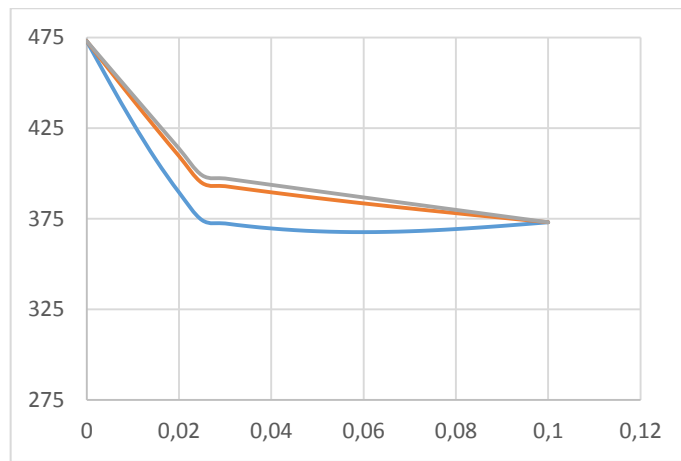


*б)*

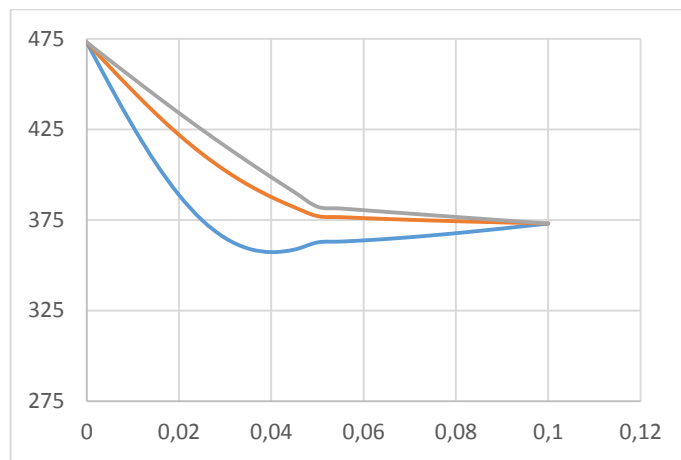


*в)*

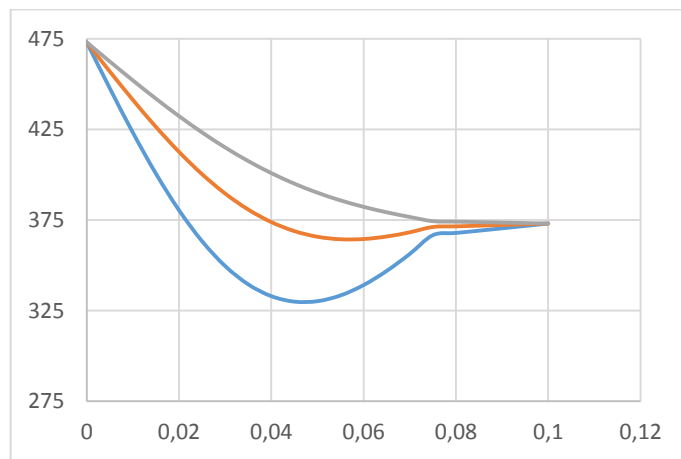
Рисунок 2.4.1.2 – Влияние вида материала второй пластины на распределение температур: *a)* – сталь-медь, *б)* – сталь-бетон, *в)* – сталь-сосна



*a)*



*б)*



*в)*

Рисунок 2.4.1.3 – Влияние толщины второй пластины на распределение температур (сталь-медь): *a)* – 0,075 м, *б)* – 0,05 м, *в)* – 0,025 м

## 2.4.2 Двумерный теплоперенос в однородной пластине

Рассматривался процесс теплопереноса в пластине (рис. 2.4.2.1).

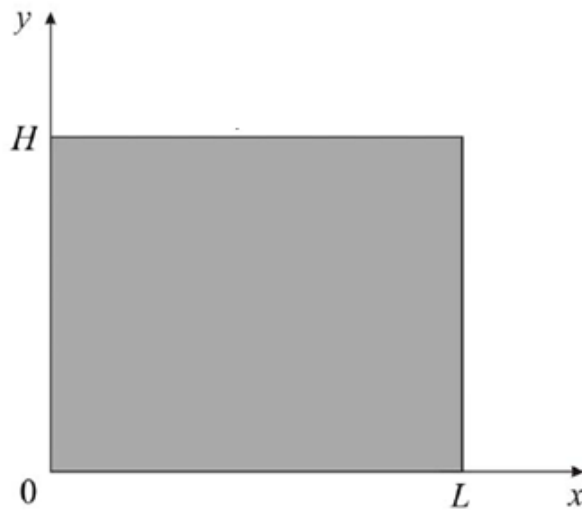


Рисунок 2.4.2.1 – Геометрия задачи

Математическая постановка задачи будет иметь вид:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad \left| \begin{array}{l} 0 < x < L; \\ 0 < y < H. \end{array} \right.$$

Начальные и граничные условия заданы следующим образом:

$$t = 0: T = T_0, \quad 0 \leq x \leq L, \quad 0 \leq y \leq H;$$

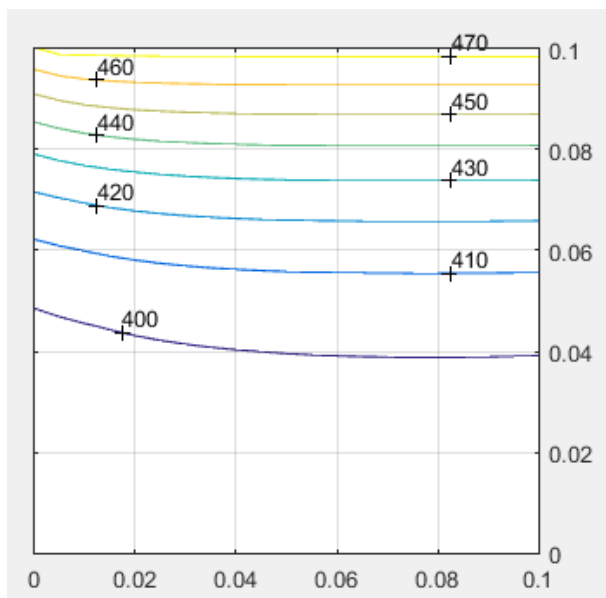
$$x = 0: -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \kappa_1 (T^{\text{e1}} - T), \quad t > 0;$$

$$x = L: -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q, \quad t > 0;$$

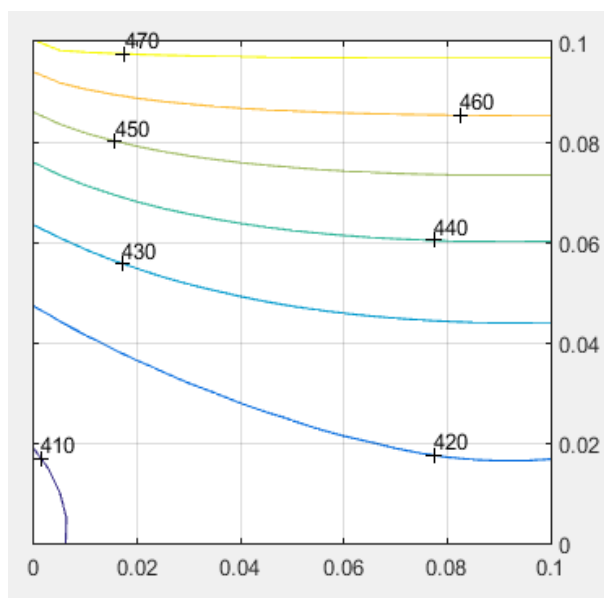
$$y = 0: -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = q, \quad t > 0;$$

$$y = H: T = T_h, \quad t > 0;$$

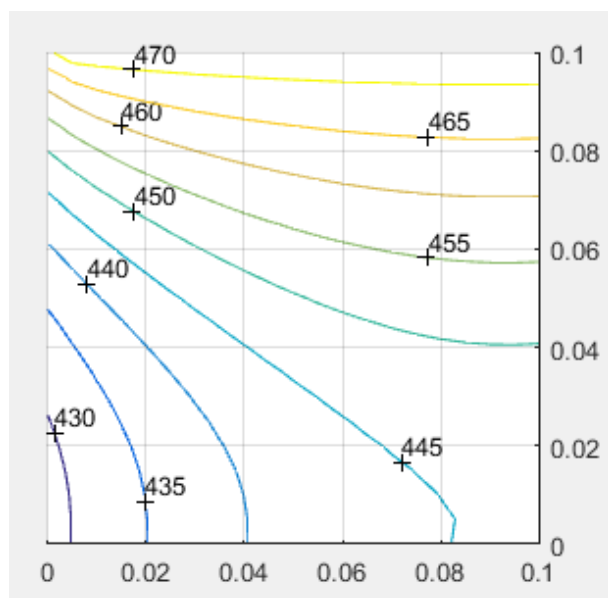
Получено температурное поле в стальной пластине через 50, 200 и 500 секунд. Длина и ширина пластины  $L=H=0,1$  м. Начальная температура  $T_0=120$  °С. Рассматривался прогрев ( $T_h=200$  °С) и охлаждение ( $T_h=-50$  °С) пластины.



a)



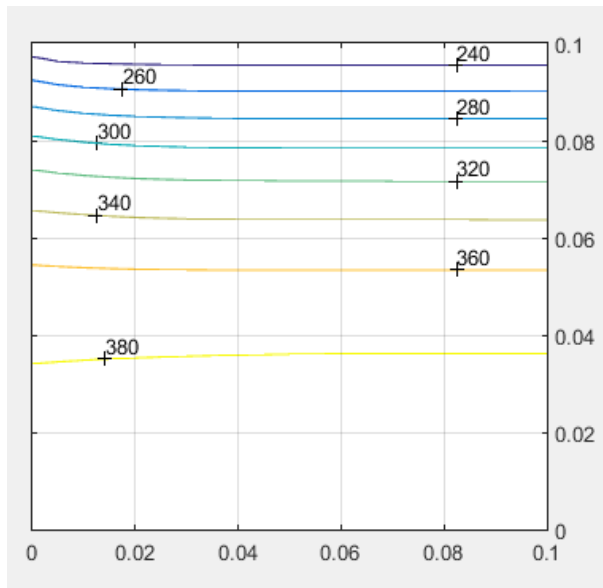
б)



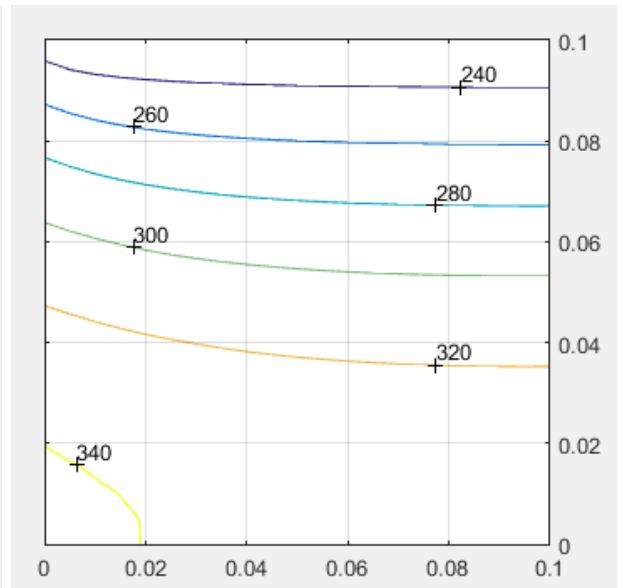
в)

Рисунок 2.4.2.2 – Прогрев пластины: а)  $t_{\text{end}}=50$  с; б)  $t_{\text{end}}=200$  с;

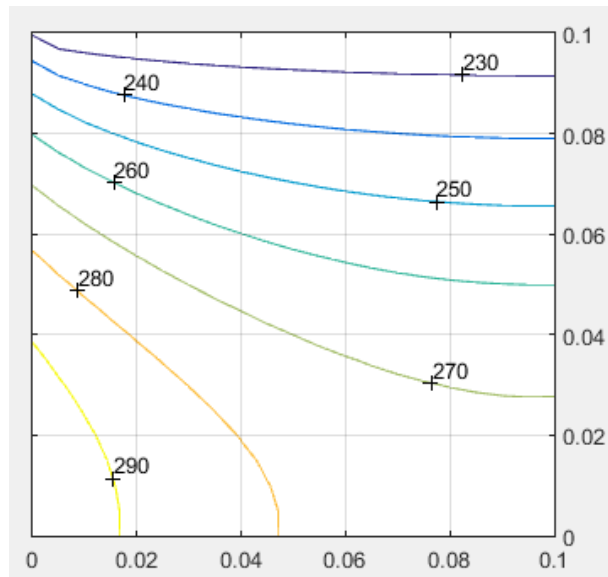
в)  $t_{\text{end}}=500$  с



*a)*



*б)*



*в)*

Рисунок 2.4.2.3 – Охлаждение пластины: *a)*  $t_{\text{end}}=50$  с, *б)*  $t_{\text{end}}=200$  с,  
*в)*  $t_{\text{end}}=500$  с

### 2.4.3 Двумерный теплоперенос в неоднородной пластине с включением

Рассматривался процесс теплопереноса для геометрии, представленной на рисунке 2.4.3.1.

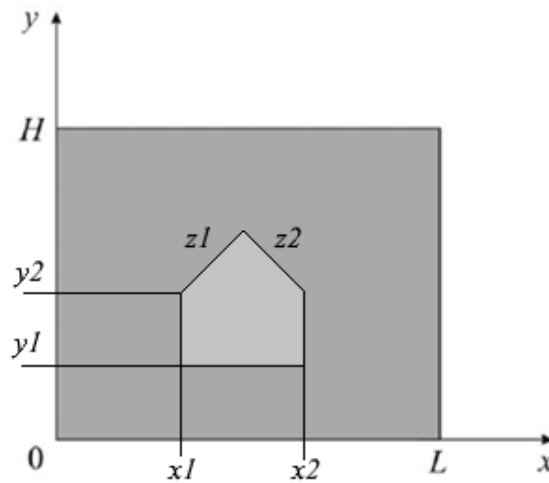


Рисунок 2.4.3.1 – Геометрия задачи

Математическая постановка задачи будет иметь вид:

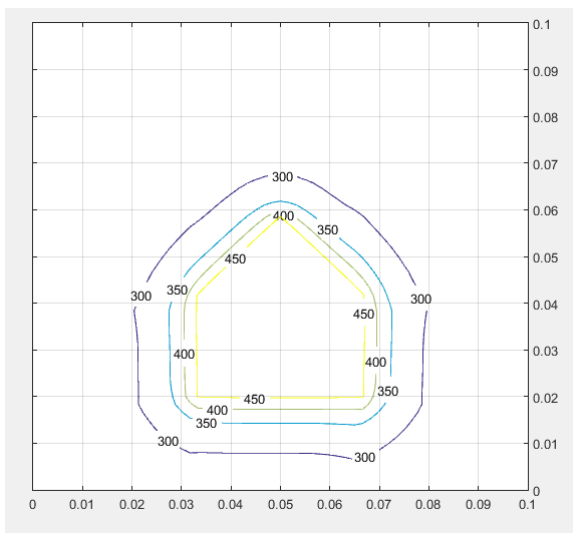
$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right), \quad \begin{array}{l} 0 < x < x_1, 0 < y < H; \\ x_1 \leq x \leq x_2, 0 < y < y_1, y_2 < y < H; \\ x_2 < x < L, 0 < y < H; \end{array}$$

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right), \quad \begin{array}{ll} x_1 < x < x_s, & y_1 < y < z_1 & z_1 = f(x) \\ x_s < x < x_2, & y_1 < y < z_2 & z_2 = f(x) \end{array}$$

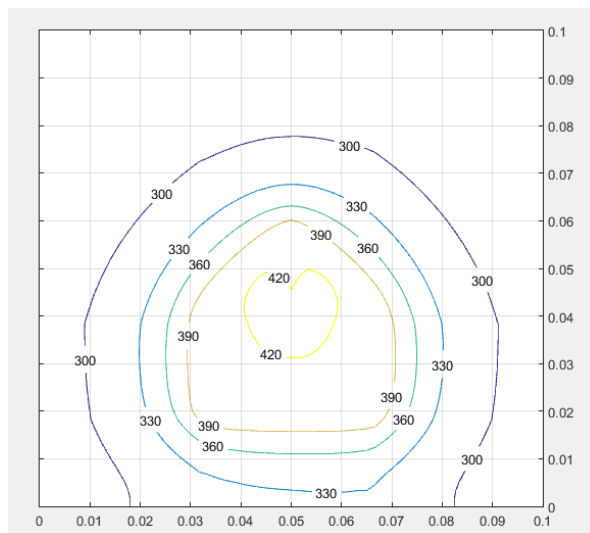
Начальные и граничные условия заданы следующим образом:

$$\begin{aligned} t = 0: T = T_0, 0 \leq x \leq L, 0 \leq y \leq H; & \quad \begin{cases} T_1(t, x, y) = T_2(t, x, y), & y_1 \leq y \leq y_2; x = x_1 \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}, & y_1 \leq y \leq y_2; x = x_2 \end{cases} \\ 0 \leq y \leq H; x = 0: -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q, t > 0; & \\ 0 \leq y \leq H; x = L: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q, t > 0; & \begin{cases} T_1(t, x, y) = T_2(t, x, y), & \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}, & x_1 \leq x \leq x_2 \quad y = y_1 \\ & x_1 \leq x \leq x_2 \quad y = z_1, z_2 \end{cases} \\ 0 \leq x \leq L \quad y = 0: -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = q, t > 0; & \\ 0 \leq x \leq L \quad y = H \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = q, t > 0; & \end{aligned}$$

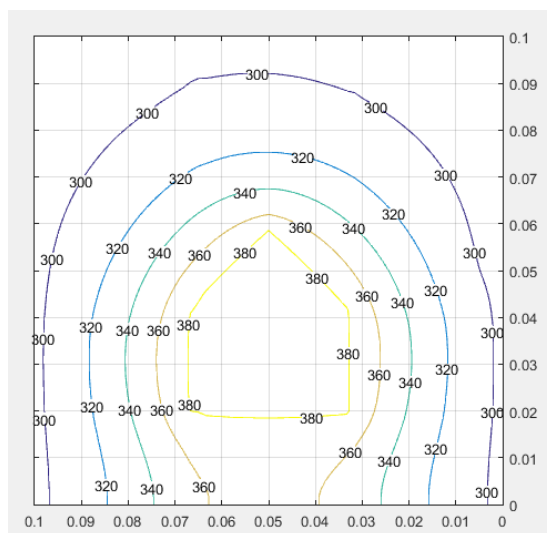
Получено температурное поле в пластине из дерева с частицей стали через 60, 300 и 900 секунд. Длина и ширина пластины  $L=H=0.1$  м. Рассматривался прогрев дерева ( $T_0=20$  °C,  $T_v=200$  °C), когда частица горячая и прогрев частицы ( $T_0=200$  °C,  $T_v=20$  °C) когда дерево горячее.



а)

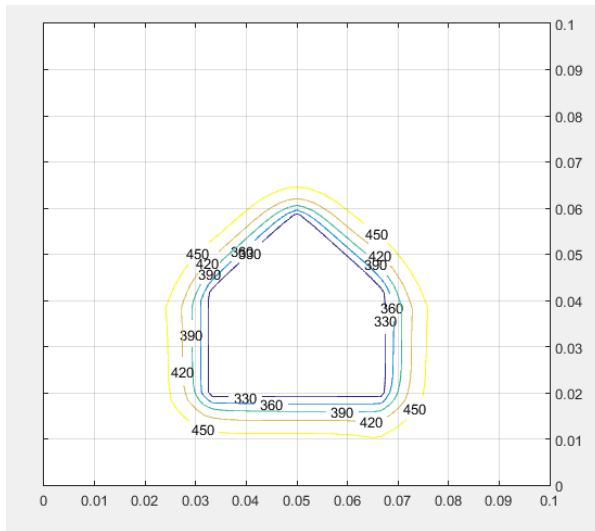


б)

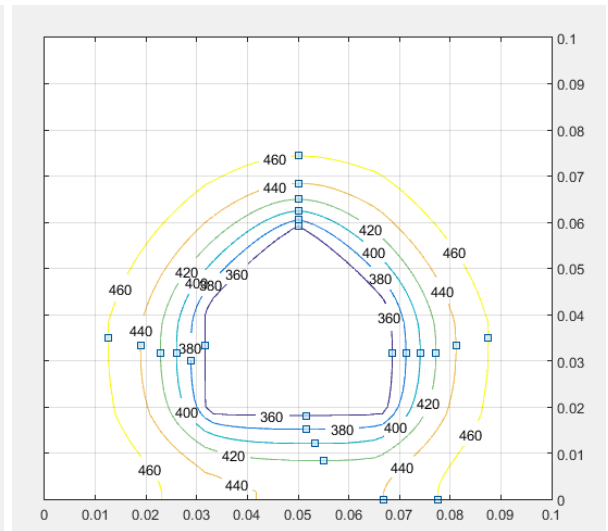


в)

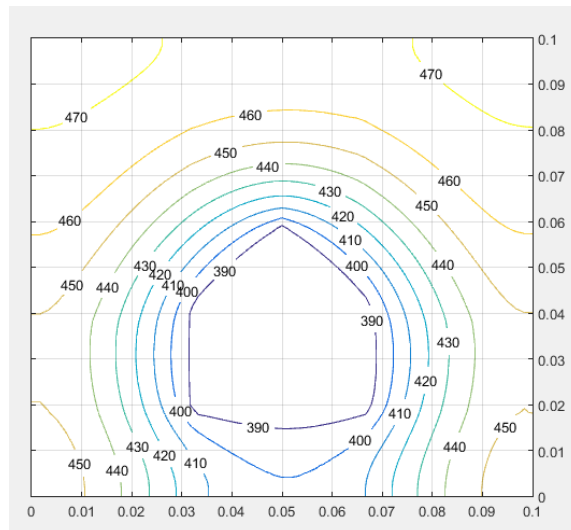
Рисунок 2.4.3.2 – Горячая частица: а)  $t_{\text{end}}=60$  с; б)  $t_{\text{end}}=300$  с;  
в)  $t_{\text{end}}=900$  с



а)



б)



в)

Рисунок 2.4.3.3 – Горячая пластина: а)  $t_{\text{end}}=60$  с; б)  $t_{\text{end}}=300$  с;

в)  $t_{\text{end}}=900$  с

#### 2.4.4 Двумерный теплоперенос в однородной пластине с химической реакцией в материале (термическое разложение) и с излучением на границах

Рассматривался теплоперенос в пластине, подверженной термическому разложению с излучением на границах. На границах осуществляется теплообмен с окружающей средой.

На рисунке 2.4.4.1 представлена геометрия, рассматриваемой задачи.

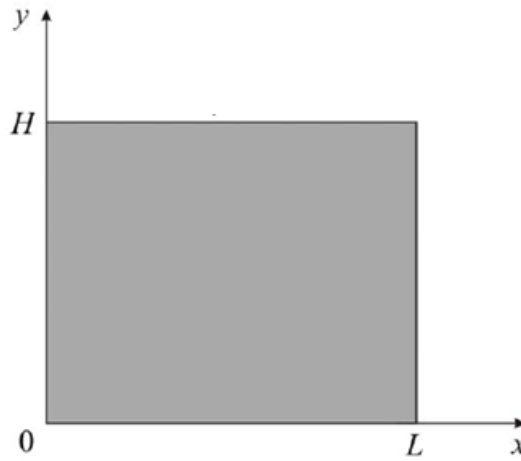


Рисунок 2.4.4.1 – Геометрия задачи

Математическая постановка задачи будет иметь вид:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q_{\text{хим}} k_0 \rho \exp \left( -\frac{E}{RT} \right), \quad \begin{cases} 0 < x < L; \\ 0 < y < H. \end{cases}$$

Начальные и граничные условия заданы следующим образом:

$$t = 0: T = T_0, \quad 0 \leq x \leq L, \quad 0 \leq y \leq H;$$

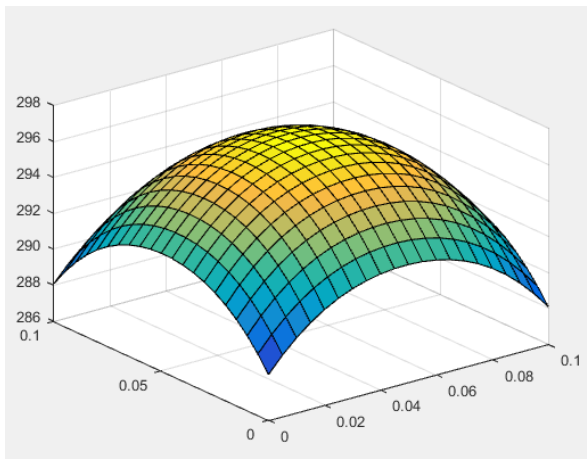
$$0 \leq y \leq H; \quad x = 0: -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \kappa_1 (T^{\text{e1}} - T) + \varepsilon \sigma \left( (T^{\text{e1}})^4 - T^4 \right), \quad t > 0, \quad \kappa_1 > 0;$$

$$0 \leq y \leq H; \quad x = L: \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \kappa_1 (T^{\text{e1}} - T) + \varepsilon \sigma \left( (T^{\text{e1}})^4 - T^4 \right), \quad t > 0, \quad \kappa_1 > 0;$$

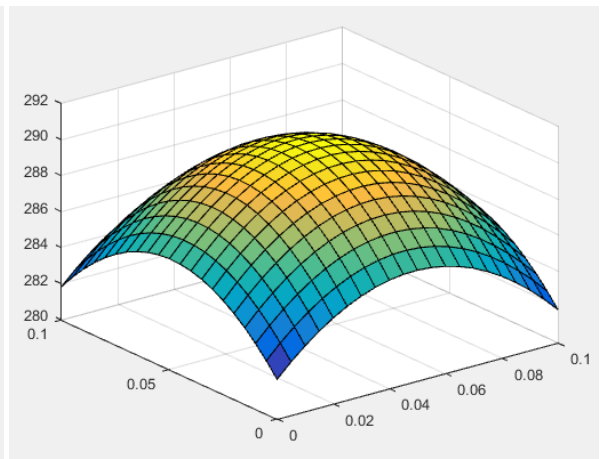
$$0 \leq x \leq L \quad y = 0: -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \kappa_1 (T^{\text{e1}} - T) + \varepsilon \sigma \left( (T^{\text{e1}})^4 - T^4 \right), \quad t > 0, \quad \kappa_1 > 0;$$

$$0 \leq x \leq L \quad y = H \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \kappa_1 (T^{\text{e1}} - T) + \varepsilon \sigma \left( (T^{\text{e1}})^4 - T^4 \right), \quad t > 0, \quad \kappa_1 > 0;$$

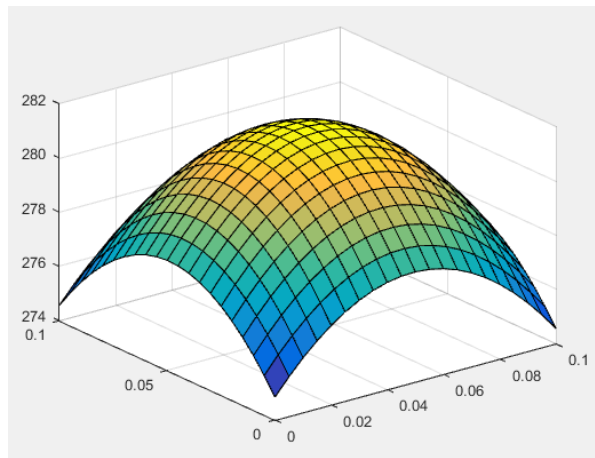
Получено температурное поле в пластине через 600, 1800 и 3600 секунд. Пластина 0,1х0,1 м. Начальная температура  $T_0=298$  К. Материал пластины – полимер со следующими теплофизическими характеристиками  $\lambda=0,7$  Вт/(м·К),  $\rho=1500$  кг/м<sup>3</sup>,  $c=750$  Дж/(кг·К). На границах пластина контактирует с окружающей средой ( $\kappa=200$  Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $T_e=243$ К).  $q_{\text{хим}}=10^3$  Вт/кг,  $k_0=3 \cdot 10^4$ ,  $E=8 \cdot 10^4$  Дж/моль.



*a)*



*б)*



*в)*

Рисунок 2.4.4.2 – Охлаждение пластины: *a)*  $t_{\text{end}}=10$  с; *б)*  $t_{\text{end}}=30$  с;  
*в)*  $t_{\text{end}}=60$  с

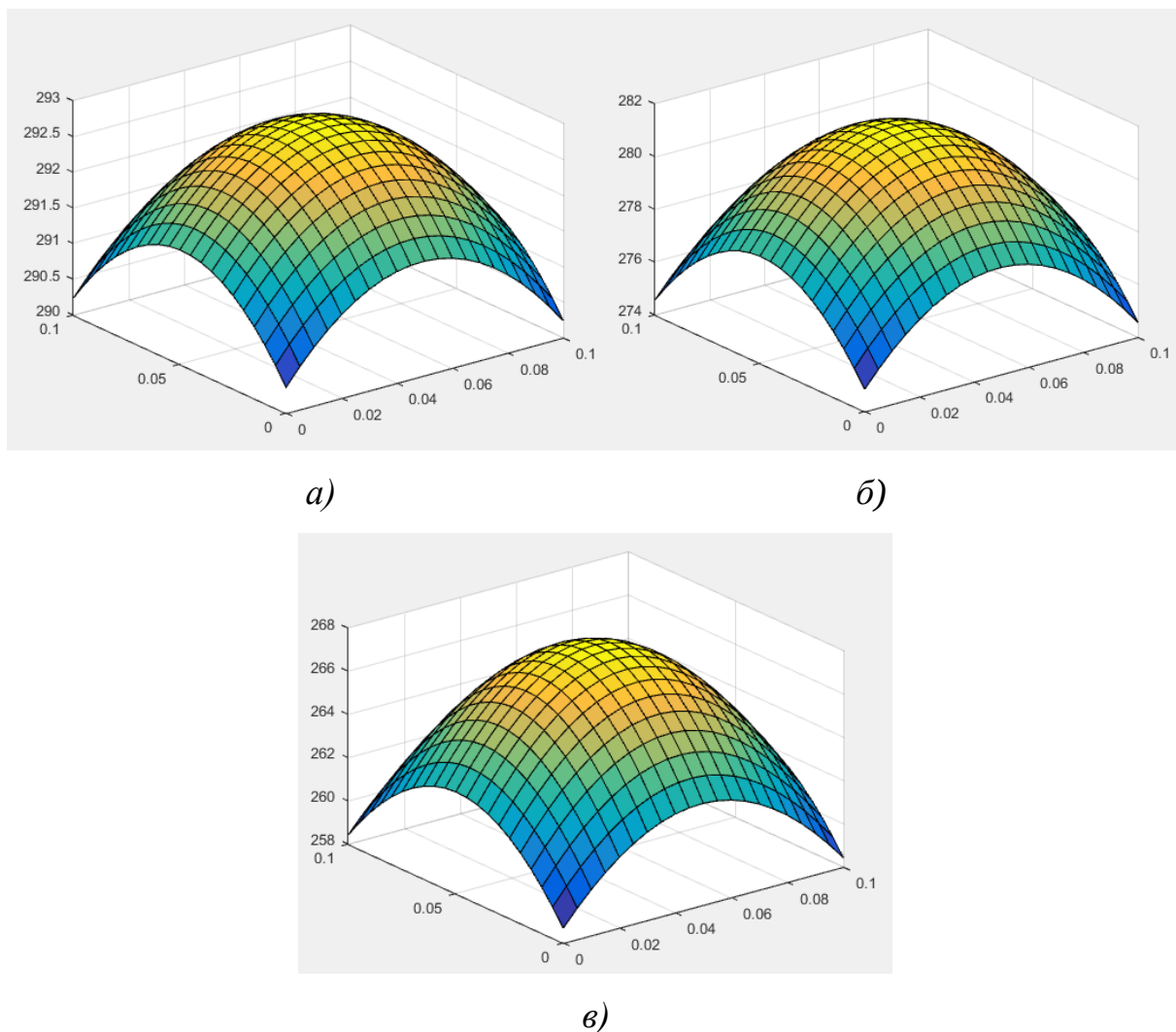


Рисунок 2.4.4.3 – Охлаждение пластины при  $t_{\text{end}}=200$  с и разным коэффициенте теплоотдачи ( $k$ ):

а)  $k = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , б)  $k = 200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , в)  $k = 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

#### 2.4.5 Тестовой расчет теплопереноса при равенности теплофизических характеристик термоэлектродов

С целью верификации математической модели (2.2.4)–(2.2.7) (см. п. 2.2) был проведен тестовый расчет теплопереноса при равенности теплофизических характеристик термоэлектродов. Результаты вычислительных экспериментов приведены на рис. 2.4.5.1.

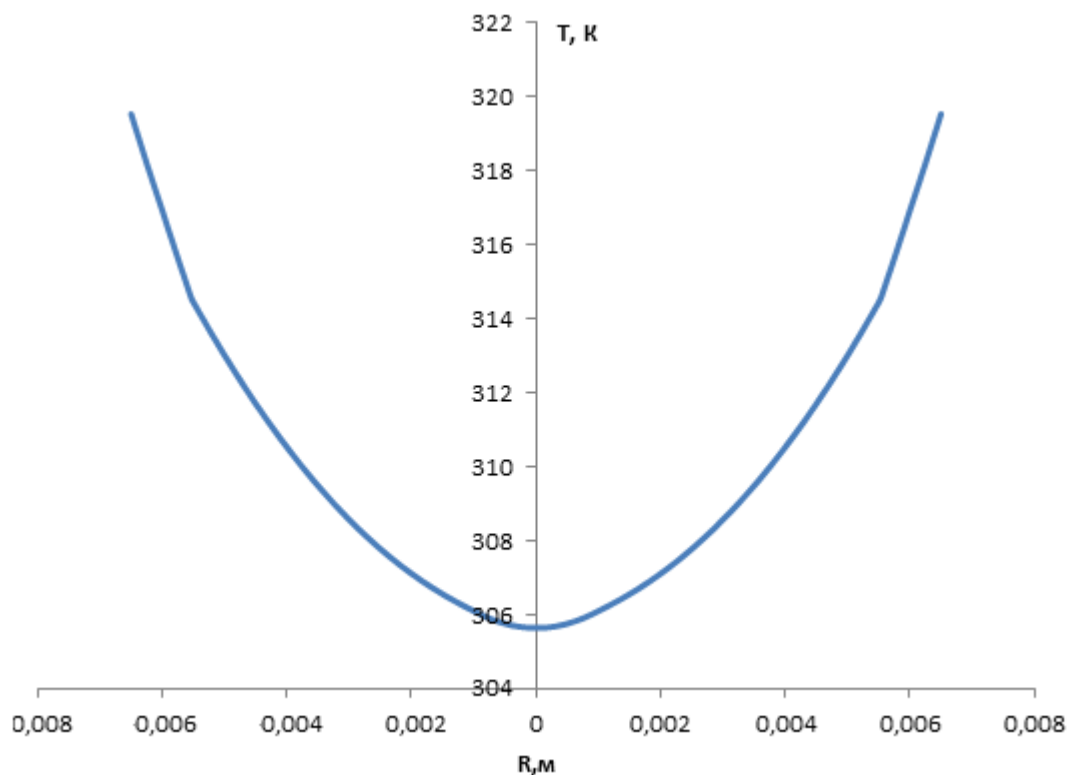


Рисунок 2.4.5.1 – Параболическая кривая температуры

Можно отметить, что температурная кривая представляет собой параболу с центром симметрии на оси термопары. Последнее свидетельствует о физичности результатов расчета. Соответственно можно сказать, что разработанная математическая модель с достаточно высокой степенью точности проводит прогностический анализ процессов теплопереноса в условиях интенсивного нагрева КТ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы впервые разработана группа физических и математических моделей, обеспечивающая адекватное моделирование процессов теплопереноса, протекающих совместно в условиях интенсивного радиационно-конвективного теплообмена при изготовлении кабельных термопар.

Рассмотрено влияния условий теплообмена, лучистой составляющей теплообмена, теплофизических характеристик термоэлектродов, возможного наличия влажности в изоляционном слое на условия изготовления кабельных термопар.

Представленные в работе математические модели, а также сформулированные рекомендации можно использовать при выборе температурных режимов полимеризации изоляционных слоев кабельных термопар, а также прогностической оценке процессов полимеризации при известных параметрах работы полимеризационной печи.

Разработана автоматизированная система управления полимеризационной печи, для возможной реализации которой спроектированы: структурная схема и функциональная схема; составлена заказная спецификация приборов и средств автоматизации; принципиальная электрическая схема соединений, общий вид и спецификация оборудования щита управления.

Приведено экономическое обоснование разработанного проекта, в результате которого была составлена смета затрат технического проекта и календарный график-план выполнения.

Выполнен анализ наличия вредных и опасных факторов, а также их воздействие на исследователя и рабочий персонал, перечислены меры по снижению данного воздействия.