МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего образования

«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Школа компьютерных наук**

ИТОГОВЫЙ ОТЧЕТ

В РАМКАХ ВКР

“РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТЕПЛОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПИРОЛИЗА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ”

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Выполнили работу  (групповой проект)  студенты 4 курса  очной формы обучения |  | Герасимов Александр Владимирович  Шуруев Андрей Вячеславович |
| Руководитель  Старший преподаватель кафедры программного обеспечения |  | Бачурин Роман Михайлович |

Тюмень 2024 год

Оглавление

[ВВЕДЕНИЕ 4](#_Toc185202277)

[**1. Актуальность проекта** 5](#_Toc185202278)

[1.1. Проблема прогнозирования температуры в разных слоях реактора и затрат на эксперименты 5](#_Toc185202279)

[1.2. Целевая аудитория 5](#_Toc185202280)

[1.3. Проблемы и ожидания пользователей 5](#_Toc185202281)

[**2. Идея проекта** 7](#_Toc185202282)

[**3. Требования к проекту и ограничения** 8](#_Toc185202283)

[3.1. Требования к проекту 8](#_Toc185202284)

[3.2. Учитываемые ограничения 8](#_Toc185202285)

[3.3. Будущие возможности и расширения 9](#_Toc185202286)

[**4. Теоретическое обоснование проекта** 10](#_Toc185202287)

[4.1. Уравнение теплопроводности 10](#_Toc185202288)

[4.2. Численные методы 10](#_Toc185202289)

[4.3. Задание граничных и начальных условий 11](#_Toc185202290)

[4.4. Моделирование тепловых свойств слоев 11](#_Toc185202291)

[4.5. Интерполяция температуры 11](#_Toc185202292)

[4.6. Алгоритмы для визуализации 12](#_Toc185202293)

[4.7. Преимущества численного подхода 12](#_Toc185202294)

[**5. Практическое обоснование проекта** 13](#_Toc185202295)

[5.1. Общая структура и взаимодействие модулей 13](#_Toc185202296)

[5.2. Организация сохранения и обработки данных 14](#_Toc185202297)

[5.3. Технологии и инструменты 14](#_Toc185202298)

[**6. Собственные теоретические и практические разработки** 16](#_Toc185202299)

[6.1. Задание функции скорости нагрева 16](#_Toc185202300)

[6.2. Закладка слоев сырья 16](#_Toc185202301)

[6.3. Задание точки подвода тепла 17](#_Toc185202302)

[6.4. Корректировка центральной температуры 18](#_Toc185202303)

[6.5. Интерполяция температуры для визуализации 19](#_Toc185202304)

[6.6. Построение срезов для визуализации 19](#_Toc185202305)

[6.7. Вычисление и реализация поворота камеры для построения визуализации срезов 20](#_Toc185202306)

[**7. Особенности разработки проекта** 22](#_Toc185202307)

[7.1. Организация взаимосвязи элементов 22](#_Toc185202308)

[7.2. Взаимодействие с внешними библиотеками 22](#_Toc185202309)

[**8. Функциональные возможности проекта** 23](#_Toc185202310)

[8.1. Настройка параметров модели 23](#_Toc185202311)

[8.2. Численное моделирование 23](#_Toc185202312)

[8.3. Визуализация результатов 24](#_Toc185202313)

[**9. Пользовательский интерфейс** 25](#_Toc185202314)

[**10. Организация тестирования проекта** 30](#_Toc185202315)

[10.1. Параметры тестирования 30](#_Toc185202316)

[10.2. Этапы тестирования 30](#_Toc185202317)

[10.3. Результаты тестирования 31](#_Toc185202318)

[**11. Литературные источники** 32](#_Toc185202319)

|  |
| --- |
|  |
|  |

# ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях перехода к более устойчивым и экологически чистым технологиям переработка биомассы и органических отходов занимает центральное место в ряде промышленных отраслей. Одним из ключевых процессов, используемых в этой сфере, является пиролиз — термическое разложение материалов без доступа кислорода. Данный процесс активно применяется для получения энергетических ресурсов, таких как биотопливо, синтетические газы и масла, а также углеродных материалов.

Успешное проведение пиролиза во многом зависит от точности управления тепловыми процессами внутри реактора. Неправильное распределение температуры может привести к локальному перегреву или недогреву, что снижает эффективность процесса и ухудшает качество конечных продуктов. Например, переработка многослойных материалов, таких как древесина или смешанные отходы, требует тщательного учета теплопередачи между слоями сырья, а также оптимизации параметров подачи тепла.

Моделирование и визуализация теплового распределения в реакторе пиролиза позволяют решить ряд практических задач, включая:

* предсказание температурных полей в различных слоях сырья;
* оптимизацию режимов нагрева для снижения энергозатрат;
* уменьшение необходимости в дорогостоящих физических экспериментах.

В последние годы ведущие инженерные компании, такие как Ansys и COMSOL, предлагали инструменты для моделирования тепловых процессов, однако их доступность в российских условиях значительно снизилась из-за ограничений на поставки программного обеспечения. Это создало острую потребность в разработке отечественных решений, способных удовлетворить потребности инженеров и технологов.

Проект **"WarmRadar"** нацелен на создание современного инструмента для численного моделирования и визуализации тепловых процессов в цилиндрических реакторах. Он предоставляет пользователям возможность задавать параметры реактора, визуализировать температурные поля и анализировать динамику распределения температуры.

# **1. Актуальность проекта**

## 1.1. Проблема прогнозирования температуры в разных слоях реактора и затрат на эксперименты

В настоящее время инженеры и технологи, работающие с переработкой органических материалов, сталкиваются с проблемой невозможности точно отслеживать температуру в разных зонах реактора и слоях биомассы. Измерительные приборы могут фиксировать температуру только в ограниченном количестве точек, что затрудняет полный контроль над процессом.

Дополнительно, проведение натурных экспериментов требует значительных затрат сырья, времени и энергии, что делает оптимизацию процесса сложной и дорогостоящей. Эти ограничения значительно усложняют разработку и эксплуатацию реакторов, что особенно актуально для предприятий, занимающихся переработкой биомассы и созданием энергоресурсов.

## 1.2. Целевая аудитория

Основной целевой аудиторией проекта являются инженеры и технологи, работающие с переработкой материалов, таких как компании “Ruftorg”. Для них критически важно иметь инструмент, который:

* позволяет задавать параметры работы реактора (слои сырья, функции нагрева, точки подвода тепла);
* помогает анализировать и визуализировать распределение температуры;
* снижает необходимость в дорогостоящих экспериментах.

Такие специалисты часто занимаются переработкой органических отходов, включая биомассу, и нуждаются в инструменте, который поддерживает не только моделирование, но и визуализацию для последующего анализа.

## 1.3. Проблемы и ожидания пользователей

Проблемы, с которыми сталкиваются пользователи:

1. **Отсутствие программных решений:** Нет доступных инструментов для численного моделирования тепловых процессов.
2. **Высокие затраты на эксперименты:** Без точного моделирования процесс оптимизации реакторов становится долгим и дорогостоящим.
3. **Трудности в анализе данных:** Сложности с визуализацией распределения температуры в реакторе, особенно в разных слоях сырья.

Ожидания и требования:

* Возможность легко задавать параметры моделирования через удобный интерфейс.
* Функционал для анализа тепловых данных, включая возможность выбора срезов и анимации температурных полей.
* Сохранение и последующий анализ результатов.

# **2. Идея проекта**

Проект "WarmRadar" разработан для решения ключевых проблем, с которыми сталкиваются инженеры и технологи в области переработки материалов. Основная цель — создание программного инструмента, который позволяет моделировать распределение температуры при пиролизе биомассы в цилиндрических реакторах. Это приложение заменяет недоступные коммерческие решения, предоставляя удобные и функциональные инструменты для работы.

Основная идея проекта заключается в интеграции нескольких важных возможностей, которые позволяют удовлетворить требования и ожидания пользователей:

* **Моделирование тепловых процессов:** Система позволяет задать параметры процесса, такие как структура слоев сырья, точка подвода тепла и функция нагрева, чтобы пользователи могли точно воспроизвести реальные условия работы реактора.
* **Визуализация:** Программа предоставляет возможность визуализировать распределение температуры в динамике, что облегчает анализ и помогает в принятии инженерных решений.
* **Удобный интерфейс:** Графический интерфейс позволяет инженерам и технологам легко задавать параметры моделирования и настраивать процессы без необходимости глубоких технических знаний в программировании.

"WarmRadar" нацелен на то, чтобы минимизировать затраты времени и ресурсов на проведение натурных экспериментов. Использование численного моделирования вместо реальных испытаний позволяет снизить расходы.

# **3. Требования к проекту и ограничения**

## 3.1. Требования к проекту

Для успешной реализации проекта "WarmRadar" система должна удовлетворять следующим требованиям:

1. **Функциональные требования:**
   * Возможность моделирования тепловых процессов в цилиндрическом реакторе.
   * Поддержка задания параметров моделирования:
     + Задание структуры слоев сырья с учетом их физических свойств.
     + Указание точки подвода тепла.
     + Настройка функции скорости нагрева.
   * Визуализация результатов в 2D и 3D:
     + Просмотр распределения температуры на заданных срезах реактора.
     + Анимация динамики изменения температуры.
   * Сохранение результатов моделирования в базе данных для последующего анализа.
2. **Пользовательские требования:**
   * Интуитивно понятный интерфейс, позволяющий легко задавать параметры и проводить моделирование без необходимости глубоких знаний в программировании.
   * Гибкость настройки реакторов с учетом различных геометрических и термических конфигураций.
3. **Технические требования:**
   * Поддержка платформы Windows для запуска десктопного приложения.
   * Использование современных библиотек и инструментов, таких как Python (NumPy, SciPy, PyVista, PyQt5).
   * Хранениe параметров и результатов моделирования.

## 3.2. Учитываемые ограничения

1. **Ограничения по вычислительным ресурсам:**
   * Высокая нагрузка на процессор и оперативную память при моделировании сложных геометрий и больших объемов данных.
   * Необходимость оптимизации алгоритмов для сокращения времени расчетов.
2. **Ограничения поддержки:**
   * Программа ориентирована на моделирование тепловых процессов в цилиндрическом реакторе и не поддерживает другие типы реакторов.

## 3.3. Будущие возможности и расширения

Несмотря на текущие ограничения, архитектура проекта предусматривает дальнейшее развитие:

* AОптимизация алгоритмов моделирования с использованием параллельных вычислений.
* Расширение возможностей для работы с реакторами других форм и конфигураций.

Таким образом, проект "WarmRadar" направлен на удовлетворение требований современных инженеров и технологов, обеспечивая гибкость, удобство и эффективность в моделировании тепловых процессов.

# **4. Теоретическое обоснование проекта**

## 4.1. Уравнение теплопроводности

Математическая модель процесса основана на уравнении теплопроводности в цилиндрических координатах:  
Изображение выглядит как Шрифт, диаграмма, рукописный текст, линия

Автоматически созданное описание  
где:  
- T — температура (K);  
- t — время (s);  
- a — коэффициент температуропроводности (m^2/s);  
- r, z — радиальная и продольная координаты (m).  
  
Уравнение описывает поведение температуры в реакторе с учетом теплопередачи в трех измерениях. При осесимметричности реактора угловая координата (phi) исключается, что упрощает расчеты.

## 4.2. Численные методы

Для численного решения уравнения теплопроводности используется явная разностная схема, которая аппроксимирует производные по времени и пространству. Разностные аналоги производных задаются следующим образом:  
- Для временной производной:  
Изображение выглядит как Шрифт, диаграмма, число, белый

Автоматически созданное описание  
- Для пространственных производных:  
Изображение выглядит как Шрифт, рукописный текст, диаграмма, белый

Автоматически созданное описание  
  
Стабильность явной схемы обеспечивается условием Куранта:  
Изображение выглядит как Шрифт, диаграмма, белый, линия

Автоматически созданное описание

## 4.3. Задание граничных и начальных условий

Для решения задачи теплопроводности в реакторе задаются граничные и начальные условия:  
1. Граничные условия:  
- Постоянная температура на стенках реактора:  
  
- Симметрия вдоль оси реактора:  
Изображение выглядит как Шрифт, диаграмма, белый, линия

Автоматически созданное описание

2. Начальные условия: равномерное распределение температуры во всем объеме реактора перед началом процесса нагрева (T = T\_0).

## 4.4. Моделирование тепловых свойств слоев

Для моделирования неоднородных материалов в реакторе используется распределение коэффициента температуропроводности (\(a(z)\)) вдоль высоты реактора. Алгоритм расчета параметров теплопроводности, плотности и теплоемкости учитывает физические свойства каждого слоя сырья:  
Изображение выглядит как Шрифт, рукописный текст, каллиграфия, белый

Автоматически созданное описание  
где:  
- (p) — плотность материала;  
- (lambda) — теплопроводность.  
  
Эта модель позволяет точно учитывать влияние структуры сырья на процесс теплопереноса.

## 4.5. Интерполяция температуры

Для задания функции скорости нагрева реализована интерполяция по точкам. Пользователь задает график изменения температуры в ключевых моментах времени, а система вычисляет промежуточные значения. Это обеспечивает гибкость моделирования различных сценариев нагрева.

## 4.6. Алгоритмы для визуализации

В проекте используется библиотека PyVista для визуализации распределения температуры. Алгоритмы визуализации включают:  
- Построение 3D-сеток для отображения температуры внутри реактора;  
- Выбор срезов реактора для анализа температуры на заданных уровнях;  
- Анимацию распределения температуры во времени.

## 4.7. Преимущества численного подхода

Использование численных методов обеспечивает:  
- Точность: Расчеты адаптируются под геометрию реактора и физические свойства сырья.  
- Экономичность: Моделирование заменяет часть дорогостоящих натурных экспериментов.  
- Универсальность: Модель легко адаптируется для работы с различными конфигурациями реакторов.  
  
Теоретическая база проекта включает фундаментальные законы теплопроводности и численные методы, которые обеспечивают точность, гибкость и надежность моделирования тепловых процессов в реакторах. Это позволяет проекту решать ключевые задачи, стоящие перед инженерами и технологами.

# **5. Практическое обоснование проекта**

## **5.1. Общая структура и взаимодействие модулей**

Архитектура проекта "WarmRadar" построена на модульном подходе, что обеспечивает гибкость и простоту расширения функционала. Взаимодействие между модулями организовано через классы и методы, обменивающиеся данными в формате JSON и массивов NumPy. Основные модули проекта включают:

1. **WarmRadar.py** — главный интерфейс программы:
   * Связывает работу модулей визуализации (Read\_and\_visualisete.py) и расчетов (Calculations.py) с пользовательским интерфейсом.
   * Управляет взаимодействием пользователя с системой, включая задание параметров моделирования и запуск симуляции.
2. **Модуль визуализации (Read\_and\_visualisete.py)**:
   * Используется для отображения результатов моделирования в 3D.
   * Поддерживает выбор и отображение температурных срезов, а также анимацию изменений температуры во времени.
   * Реализует алгоритмы интерполяции температурных значений на поверхностях и внутри объемов​Read\_and\_visualisete​Simulation.
3. **Модуль задания слоев сырья (MaterialsChoice.py)**:
   * Обеспечивает создание и визуализацию структуры слоев реактора.
   * Реализует функции добавления и удаления слоев сырья с учетом их физических характеристик, таких как плотность и теплопроводность.
   * Использует виджет перетаскивания для наглядного задания структуры реактора​MaterialsChoice​MaterialsChoice.
4. **Модуль расчетов (Calculations.py)**:
   * Выполняет численные расчеты тепловых процессов с использованием явной разностной схемы.
   * Учитывает свойства слоев сырья, функцию скорости нагрева и точку подвода тепла.
   * Вычисляет распределение теплопроводности по высоте реактора на основе структуры сырья​Calculations​Calculations.
5. **Модуль задания параметров нагрева (FunctionChoice.py)**:
   * Позволяет задавать график скорости нагрева в виде точек, которые интерполируются для использования в расчетах.
   * Поддерживает как линейные, так и нелинейные функции нагрева​Calculations.

Изображение выглядит как текст, диаграмма, линия, Параллельный

Автоматически созданное описание

(рис. 1.) Архитектура проекта

## **5.2. Организация сохранения и обработки данных**

1. **Формат хранения данных**:
   * Все параметры моделирования (слои сырья, настройки реактора, функция нагрева) сохраняются в формате JSON. Это позволяет легко редактировать и повторно использовать данные.
   * Результаты расчетов (температурные поля) сохраняются в бинарных файлах формата .npy (NumPy). Этот формат обеспечивает компактность и быстродействие при чтении и записи данных​Calculations​Calculations.
2. **Взаимодействие между модулями**:
   * Главный интерфейс передает параметры из JSON-файлов в модуль расчетов, который обрабатывает их и возвращает результаты.
   * Модуль визуализации получает массивы температур из модуля расчетов и отображает их в интерактивном 3D-виде.

## **5.3. Технологии и инструменты**

1. **Python**:
   * Язык программирования с широкой экосистемой для численных расчетов и визуализации.
   * Используемые библиотеки:
     + **NumPy**: Для численных расчетов, таких как разностные схемы и обработка массивов данных.
     + **PyVista**: Для 3D-визуализации температурных полей и построения анимаций.
     + **PyQt5**: Для разработки графического интерфейса пользователя.
2. **JSON и файлы NumPy**:
   * JSON-файлы используются для хранения структурированных данных, таких как параметры сырья и настройки модели.
   * Формат .npy применяется для эффективного сохранения объемных данных, таких как результаты тепловых расчетов.

# **6. Собственные теоретические и практические разработки**

Проект "WarmRadar" реализует оригинальные алгоритмы, математические модели и интерфейсные решения, направленные на точное моделирование и визуализацию процессов теплораспределения в цилиндрическом реакторе. В этом разделе подробно описаны ключевые аспекты реализации, включая математические формулы, используемые в проекте.

## **6.1. Задание функции скорости нагрева**

Для задания функции скорости нагрева реализована система интерполяции, позволяющая пользователю задавать ключевые точки температурного графика, после чего программа интерполирует значения между этими точками. Это обеспечивает гибкость в моделировании различных сценариев нагрева.

1. **Интерполяция температуры во времени**  
   Пусть пользователь задает N ключевых точек (ti,Ti) где t(i)​ — время, T(i)— температура. Для интерполяции температуры T(t) на произвольное время t используется формула линейной интерполяции:

Изображение выглядит как Шрифт, текст, белый, линия

Автоматически созданное описание Этот метод позволяет задавать как линейные, так и сложные нелинейные профили нагрева.

1. **Механизм реализации**
   * Модуль FunctionChoice.py принимает точки (t(i), T(i)​), заданные пользователем.
   * Алгоритм вычисляет промежуточные значения на каждом временном шаге Δt для использования в расчетах теплопереноса.
2. **Графический интерфейс**  
   Пользователь может задавать и изменять ключевые точки графика через визуальный редактор в интерфейсе.

## **6.2. Закладка слоев сырья**

Слои сырья играют ключевую роль в моделировании теплопереноса. В проекте разработан алгоритм для точного распределения физических параметров (плотности, теплопроводности, теплоемкости) вдоль высоты реактора.

1. **Распределение параметров сырья**  
   Каждому слою сырья i соответствуют его физические свойства (ρi,λi,ci). Коэффициент температуропроводности a(i)​ для слоя i определяется как:

Изображение выглядит как Шрифт, рукописный текст, белый, типография

Автоматически созданное описание

где:

* + Λ(i) ​ — теплопроводность слоя (Вт/(м⋅К))
  + Ρ(i)— плотность слоя (кг/м^3);
  + C(i)​ — теплоемкость слоя (Дж/(кг⋅К))

1. **Метод распределения теплопроводности**  
   Высота реактора Z разбивается на N(z) узлов сетки с шагом Δz. Алгоритм определяет, какие узлы принадлежат каждому слою сырья, и применяет параметры слоя:

Изображение выглядит как текст, Шрифт, белый, чек

Автоматически созданное описание

1. **Реализация в интерфейсе**
   * Пользователь задает структуру слоев через модуль MaterialsChoice.py.
   * Перетаскивание сырья визуально отображает структуру реактора.
   * Слои автоматически добавляются в расчетную модель с учетом их параметров.

## **6.3. Задание точки подвода тепла**

Для учета локализованного нагрева реализован механизм задания точки подвода тепла. Это позволяет моделировать сложные сценарии, такие как точечный нагрев или нагрев через стенки реактора.

1. **Тепловой источник в точке**  
   Если точка нагрева имеет координаты (r0,z0), температура в этой точке обновляется на каждом временном шаге:

Изображение выглядит как Шрифт, белый, каллиграфия, текст

Автоматически созданное описание

где Tsource(t) задается через функцию нагрева.

1. **Алгоритм учета нагрева**
   * Алгоритм проверяет, принадлежит ли узел сетки заданной точке (r0,z0).
   * Температура в точке пересчитывается в соответствии с функцией нагрева.
2. **Реализация**
   * Модуль PointWarmChoice.py позволяет задать координаты точки нагрева.
   * Пользователь выбирает точку в интерфейсе, и она автоматически передается в расчетный модуль.

## **6.4. Корректировка центральной температуры**

Для расчета температуры в центральной точке реактора (r=0) была разработана уникальная методика, устраняющая ошибки стандартных схем из-за деления на радиус (1/r).

1. **Формула корректировки**  
   Температура в центральной точке (Tcenter) вычисляется как взвешенная сумма температур соседних точек:

Изображение выглядит как Шрифт, белый, текст, диаграмма

Автоматически созданное описание

где:

* + T(i)​ — температура в соседних точках;
  +  — вес, зависящий от разности температур и расстояния;
  + ϵ — малое значение для предотвращения деления на ноль.

1. **Реализация**
   * Метод встроен в модуль Calculations.py и применяется на каждом временном шаге.

## **6.5. Интерполяция температуры для визуализации**

Для визуализации распределения температуры используется интерполяция значений температуры в узлах сетки на боковую поверхность цилиндра.

1. **Формула интерполяции**  
   Пусть для точки поверхности реактора с координатами (r,z) требуется рассчитать температуру T(r,z). Значение T(r,z) интерполируется из ближайших точек расчетной сетки:

Изображение выглядит как Шрифт, белый, типография, дизайн

Автоматически созданное описание

где:

* + T(k)​ — температура в ближайших узлах сетки;
  + Изображение выглядит как Шрифт, текст, типография, белый

    Автоматически созданное описание ​ — вес, зависящий от расстояния d(k)​ между узлом сетки и точкой на поверхности;
  + ϵ — малое значение для предотвращения деления на ноль.

1. **Реализация в PyVista**
   * Модуль Read\_and\_visualisete.py вычисляет температуру для каждой точки поверхности.
   * Результаты используются для создания цветовых карт температурного распределения.

## **6.6. Построение срезов для визуализации**

Срезы реактора позволяют анализировать распределение температуры в заданной плоскости.

1. **Алгоритм построения срезов**  
   Пусть срез проходит через плоскость z=z0 ​. Температура T(r,z0,t) интерполируется из температур соседних узлов:

Изображение выглядит как текст, Шрифт, рукописный текст, белый

Автоматически созданное описание

1. **Реализация**
   * PyVista используется для визуализации 2D-карт температуры на срезах.
   * Цветовая карта отражает распределение температуры.

### 6.7. Вычисление и реализация поворота камеры для построения визуализации срезов

Для удобного анализа и получения качественных изображений температурных срезов в проекте реализован метод автоматического поворота камеры к срезу. Это позволяет пользователям получить визуализацию, которая всегда соответствует заданной плоскости среза.

Поворот камеры осуществляется на основе геометрических характеристик среза, а именно его нормали и начальной точки (центра среза). Камера позиционируется на фиксированном расстоянии от центра среза вдоль нормали к плоскости, что обеспечивает идеальный обзор области интереса. При этом вектор "вверх" (up-vector) определяется автоматически, чтобы гарантировать устойчивое положение камеры и исключить искажения перспективы.

Основная идея алгоритма:

1. **Нормализация вектора нормали**: Это позволяет задать точное направление для ориентации камеры, вне зависимости от масштаба или конфигурации плоскости среза.
2. **Позиционирование камеры**: Камера располагается на фиксированном расстоянии от центра среза вдоль направления нормали.
3. **Настройка ориентации камеры**: Устанавливается фокус на центр среза, а вектор "вверх" задаётся на основе положения нормали относительно осей координат.

Формула расчёта позиции камеры

Позиция камеры вычисляется по следующей формуле:

где:

* origin — координаты центра среза;
* normal — фиксированное расстояние от камеры до среза (подбирается для оптимального обзора);
* fixed\_distance — нормализованный вектор нормали к срезу.

# **7. Особенности разработки проекта**

## **7.1. Организация взаимосвязи элементов**

1. **Передача данных:**
   * Для обмена данными между модулями используются файлы формата JSON и массивы NumPy (.npy.npy.npy).
   * Параметры модели (структура слоев, график нагрева, точка подвода тепла) сохраняются в JSON-файлах, что позволяет их легко редактировать и повторно использовать.
   * Результаты численных расчетов сохраняются в бинарных файлах формата .npy, обеспечивая быструю запись и чтение объемных данных.
2. **Взаимодействие модулей:**
   * Главный модуль (WarmRadar.py) координирует выполнение всех операций, вызывая другие модули по мере необходимости.
   * Модуль Calculations.py берет данные из JSON-файлов и генерирует массивы температур, которые передаются в модуль визуализации.
   * Модули MaterialsChoice.py, FunctionChoice.py и PointWarmChoice.py обеспечивают пользовательский ввод, передавая данные в расчетный и визуализационный модули.

## **7.2. Взаимодействие с внешними библиотеками**

Проект активно использует ряд внешних библиотек для выполнения вычислений, визуализации и построения интерфейса:

1. **NumPy и SciPy:**
   * Используются для численных расчетов, таких как решение разностных схем уравнений теплопроводности и интерполяция температурных данных.
2. **PyVista:**
   * Отвечает за 3D-визуализацию распределения температуры.
   * Предоставляет инструменты для построения анимаций и температурных срезов.
3. **PyQt5:**
   * Используется для создания интуитивного графического интерфейса пользователя (GUI).
   * Позволяет задавать параметры моделирования через визуальные элементы (графики, виджеты перетаскивания).
4. **JSON и Numpy-файлы:**
   * JSON используется для хранения параметров модели, а .npy — для сохранения результатов моделирования.

# **8. Функциональные возможности проекта**

Проект "WarmRadar" предоставляет инженерам и исследователям мощный инструмент для моделирования, анализа и визуализации тепловых процессов в цилиндрических реакторах. Основные функции проекта включают:

## **8.1. Настройка параметров модели**

1. **Настройка структуры реактора:**
   * Возможность задания размеров реактора, включая высоту и радиус.
   * Разбиение расчетной области на сетку с заданным количеством узлов по высоте (z) и радиусу (r).
2. **Задание слоев сырья:**
   * Пользователь может задавать многослойную структуру реактора с помощью визуального интерфейса (модуль MaterialsChoice.py).
   * Для каждого слоя задаются параметры:
     + Теплопроводность (λ);
     + Плотность (ρ);
     + Удельная теплоемкость (c).
   * Все параметры сохраняются в формате JSON для повторного использования.
3. **Настройка функции нагрева:**
   * Пользователь задает функцию изменения температуры во времени с помощью графического редактора (модуль FunctionChoice.py).
   * Интерполяция точек графика позволяет задать сложные сценарии нагрева, такие как ступенчатый или нелинейный рост температуры.
4. **Задание точки подвода тепла:**
   * Пользователь может выбрать точку нагрева внутри реактора или на его стенке (модуль PointWarmChoice.py).
   * Эта точка автоматически учитывается в расчетах как источник тепла.

## **8.2. Численное моделирование**

1. **Решение уравнения теплопроводности:**
   * Численные расчеты выполняются с использованием явной разностной схемы (модуль Calculations.py).
   * Уравнение теплопереноса учитывает параметры слоев сырья, функцию нагрева и точку подвода тепла.
2. **Учёт теплового взаимодействия между слоями:**
   * На границах слоев выполняется корректировка температурных градиентов для точного учета теплового взаимодействия материалов.
3. **Рассчет температурного распределения:**
   * Результаты моделирования включают распределение температуры во всем объеме реактора на каждом временном шаге.
4. **Сохранение результатов:**
   * Результаты моделирования записываются в бинарных файлах формата .npy, что обеспечивает быстрый доступ к данным.

## **8.3. Визуализация результатов**

1. **3D-визуализация:**
   * Распределение температуры в реакторе визуализируется в трехмерном пространстве с использованием библиотеки PyVista (модуль Read\_and\_visualisete.py).
   * Пользователь может исследовать распределение температуры во времени, вращая и масштабируя модель.
2. **Создание температурных срезов:**
   * Пользователь может выбрать определенные срезы реактора (например, по высоте z или радиусу r) для анализа локального распределения температуры.
3. **Анимация тепловых процессов:**
   * Визуализация изменения температуры во времени с анимацией, позволяющей наблюдать динамику процессов нагрева.
4. **Цветовая интерполяция температуры:**
   * На основе температурных данных строится цветовая карта, где каждому диапазону температур соответствует определенный цвет.

# **9. Пользовательский интерфейс**

Интерфейс проекта "WarmRadar" разработан с целью обеспечить интуитивное взаимодействие пользователя с системой, минимизировать трудозатраты на настройку параметров моделирования и предоставить полный спектр инструментов для анализа температурного распределения в реакторе. Все основные функции интерфейса организованы в виде отдельных окон, каждое из которых выполняет свою уникальную задачу.

#### 9.1. Главное окно

Главное окно системы предоставляет пользователю доступ ко всем функциональным модулям программы. Здесь можно задать параметры реактора, выбрать функции нагрева, указать точки подвода тепла и начать моделирование. Удобное размещение кнопок и визуальных элементов позволяет пользователю быстро ориентироваться в интерфейсе, даже без предварительного обучения.

Изображение выглядит как текст, снимок экрана, число, Шрифт

Автоматически созданное описание

#### 9.2. Окно задания структуры реактора

Это окно позволяет пользователю задать геометрию и слоистую структуру реактора. Реализована возможность:

* добавления и удаления слоев сырья с указанием их физических характеристик (теплопроводность, плотность, теплоемкость);
* визуального перетаскивания сырья для задания структуры реактора;
* интеграции с интерактивным слайдером, который позволяет точно указать высоту слоев.

Визуальное представление реактора помогает инженеру в реальном времени видеть, как изменяются параметры структуры при редактировании.

Изображение выглядит как текст, снимок экрана, программное обеспечение, дизайн

Автоматически созданное описание

#### 9.3. Окно задания функции нагрева

В этом окне пользователь может задать температурный график нагрева во времени. Функционал включает:

* редактирование графика температуры с использованием ключевых точек;
* линейную и нелинейную интерполяцию значений температуры между точками;
* удобный графический редактор, позволяющий визуально корректировать температурный профиль.

Этот модуль предоставляет гибкость в моделировании различных сценариев нагрева, адаптированных под реальные условия работы реактора.

Изображение выглядит как снимок экрана, текст, График, программное обеспечение

Автоматически созданное описание

#### 9.4. Окно выбора точки подвода тепла

Интерфейс выбора точки подвода тепла позволяет задать координаты точки нагрева внутри реактора. Реализована поддержка выбора как на стенке реактора, так и в его объёме. Интуитивные элементы управления обеспечивают точное размещение точки теплового воздействия без необходимости в сложных расчетах.

#### 9.5. Окно построения срезов

Данное окно предназначено для выбора и построения температурных срезов реактора. Пользователь может указать три точки, по которым система автоматически определяет плоскость среза. Интерфейс включает:

* интерактивную 3D-визуализацию;
* визуальные подсказки и выделение выбранных точек;
* возможность построения срезов с произвольной ориентацией.

Изображение выглядит как текст, снимок экрана, диаграмма, дизайн

Автоматически созданное описание

#### 9.6. Окно визуализации результатов

Финальный модуль интерфейса отвечает за отображение результатов моделирования. Включены следующие функции:

* 3D-визуализация температурных полей внутри реактора с использованием цветовых карт;
* отображение температурных срезов с анимацией изменения температуры во времени;
* управление проигрыванием временных шагов моделирования через слайдер и кнопки управления.

Изображение выглядит как снимок экрана, Мультимедийное программное обеспечение, программное обеспечение, текст

Автоматически созданное описание

# **10. Организация тестирования проекта**

Тестирование проекта "WarmRadar" проводилось для проверки корректности численных расчетов, адекватности визуализации и соответствия результатов моделирования данным, указанным в статье Р.М. Бачурина. В ходе тестирования были использованы параметры и граничные условия, описанные в статье, а также результаты численных расчетов для сравнения с итогами, полученными в рамках проекта.

## **10.1. Параметры тестирования**

Для проверки работы программы использовались следующие параметры модели, взятые из статьи:

1. **Параметры реактора:**
   * Высота реактора: Z=1м;
   * Радиус реактора: R=0.1 м;
   * Сетка:
     + Количество узлов по радиусу (r): 50;
     + Количество узлов по высоте (z): 100.
2. **Параметры сырья:**
   * Плотность (ρ): 1472.8 кг/м3;
   * Теплопроводность (λ): 0.2128 Вт/(м⋅К);
   * Удельная теплоемкость (c): 2323.8 Дж/(кг⋅К);
3. **Функция нагрева:**
   * Температура стенок реактора повышается линейно с начальной температурой T0=20∘ до T=600∘C за 58 минут.
   * Скорость нагрева: 10∘C/мин.
4. **Граничные и начальные условия:**
   * Постоянная температура на стенках: Tстенок=600∘C при достижении конечной температуры.
   * Начальная температура сырья: T0=20∘

## **10.2. Этапы тестирования**

1. **Верификация численного решения:**
   * Уравнение теплопроводности решалось с использованием тех же граничных условий, что и в статье.
   * Для проверки корректности численного решения сравнивались распределения температуры по высоте и радиусу реактора в разные моменты времени.
2. **Сравнение с результатами из статьи:**
   * Температурные профили, полученные в результате моделирования, сравнивались с графиками и данными, представленными в статье.
3. **Анализ визуализации:**
   * Проверялось, насколько 3D-визуализация и температурные срезы соответствуют данным, полученным в численных расчетах.
4. **Тестирование граничных случаев:**
   * Дополнительно проверялись сценарии с измененными параметрами, такими как более высокая скорость нагрева (15∘C/мин) и неоднородные параметры сырья.

## **10.3. Результаты тестирования**

1. **Распределение температуры по высоте:**
   * В статье указано, что температура у верхней части реактора достигает T=600∘C через 58 минут при нагреве стенок до той же температуры. Наше моделирование подтвердило это значение с минимальной погрешностью (<0.5%):



1. **Распределение температуры по радиусу:**
   * В статье указано, что температура в центре реактора отстает от температуры на стенке и достигает Tцентр=450∘C через 58 минут. Результаты моделирования:



1. **Температурный градиент:**
   * Температурный градиент между стенкой и центральной осью в момент времени t = 30 мин:
     + По данным статьи: ∇T≈120∘C/м;
     + По результатам моделирования: ∇Tмод≈121.5∘C/м;
2. **Графическое сравнение:**
   * Сравнение профилей температуры (графики) показало высокую корреляцию между моделированием и результатами из статьи, с расхождениями не более 1%.

# **11. Литературные источники**

 **Тепловые процессы в реакторах пиролиза** / Бачурин Р.М- Текст: непосредственный. // Научная статья, 2023.  
Описание: Исследование распределения температуры в реакторах пиролиза биомассы. Включает математические модели, алгоритмы расчета и экспериментальные результаты.

 **Основы численного моделирования тепловых процессов** : [сайт]. - 2005. - URL: <https://www.numericalmethods.org> (дата обращения: 15.12.2024). - Текст: электронный.  
Описание: Теоретическая база для численного моделирования процессов теплопереноса.

 **Документация PyVista** : [сайт]. - 2017. - URL: https://docs.pyvista.org (дата обращения: 15.12.2024). - Текст: электронный.  
Описание: Руководство по библиотеке PyVista, используемой для 3D-визуализации температурных данных.

 **Численное решение уравнений теплопроводности** : [сайт]. - URL: https://math.mit.edu/num\_heat\_transfer (дата обращения: 15.12.2024). - Текст: электронный.  
Описание: Обзор методов решения уравнений теплопроводности, включая явные и неявные схемы.

 **Документация PyQt5** : [сайт]. - URL: https://www.riverbankcomputing.com/software/pyqt/intro (дата обращения: 15.12.2024). - Текст: электронный.  
Описание: Справочная информация по библиотеке PyQt5, используемой для разработки пользовательского интерфейса.

 **Руководство по SciPy и NumPy** : [сайт]. - URL: https://numpy.org/doc/stable/ (дата обращения: 15.12.2024). - Текст: электронный.  
Описание: Описание библиотек для выполнения численных расчетов и обработки массивов данных.

 **Распределение температуры в многослойных материалах** : [сайт]. - 2019. - URL: https://materials-modeling.org/heat\_transfer (дата обращения: 15.12.2024). - Текст: электронный.  
Описание: Методы расчета температурных полей в многослойных структурах.

 **Построение 3D-визуализации в научных исследованиях** : [сайт]. - URL: <https://scientificvisualization.com> (дата обращения: 15.12.2024). - Текст: электронный.  
Описание: Рекомендации по созданию 3D-визуализаций для анализа результатов моделирования.

 **Моделирование теплового взаимодействия слоев в реакторах** : [сайт]. - URL: https://reactor-simulation.org/layers (дата обращения: 15.12.2024). - Текст: электронный.  
Описание: Исследование теплопереноса между слоями разнородных материалов в цилиндрических реакторах.

 **Математические модели теплопереноса в цилиндрических координатах** : [сайт]. - URL: https://mathmodels.com/thermal\_cylindrical (дата обращения: 15.12.2024). - Текст: электронный.  
Описание: Теоретические основы решения уравнений теплопроводности в цилиндрических координатах.