

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«МИФИ»

---

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА №31 ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА

Отчет

по научно-исследовательской работе на тему:

«Оптимизация канального радиатора»

*Выполнил: Есис А. И.*

*Руководитель проекта: Чмыхов М. А.*

г. Москва 2023

## Аннотация

В данной работе проведено комплексное исследование теплоотводящей системы радиатора с использованием интегрированных вычислительных инструментов. В начальной стадии исследования была построена геометрия и сетка радиатора с применением программного комплекса SALOME Меса. Далее, для получения данных о тепловом и газодинамическом поведении системы, были проведены численные симуляции с использованием программного пакета OpenFOAM.

Основным этапом работы стал анализ результатов численных симуляций и совершенствования геометрии радиатора с использованием методов оптимизации. Первоначальная оптимизация включала в себя полный перебор точек в пространстве параметров, что позволило выделить оптимальные конфигурации. Затем был применен эволюционный алгоритм, который существенно ускорил процесс оптимизации, сократив количество необходимых расчетов.

Дополнительно, использовались градиентные методы оптимизации, такие как L-BFGS-B, для повышения эффективности процесса оптимизации. Каждый этап исследования включал в себя визуализацию результатов при помощи ParaView.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки и улучшения радиаторов в различных инженерных областях, где необходим теплоотвод.

# Содержание

# Введение

Программные продукты OpenFOAM, ParaView и SALOME Меса представляют собой мощный инструментарий, широко используемый в области вычислительной гидродинамики (CFD) и численного моделирования. Совместное использование этих инструментов обеспечивает комплексное решение для анализа и визуализации сложных физических процессов, таких как течение жидкостей, теплообмен, движение твердых тел и другие.

OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) – свободное и открытое программное обеспечение, предназначенное для решения уравнений Навье-Стокса и других математических моделей, связанных с течением жидкостей и газов. Этот инструмент предоставляет разнообразные методы решения, что позволяет исследовать различные типы потоков и применять различные физические модели. OpenFOAM является расширяемым и настраиваемым инструментом, который можно адаптировать под конкретные задачи и требования.

ParaView обеспечивает возможности визуализации результатов численных симуляций. Он поддерживает создание различных графических представлений, включая 2D и 3D графику, контурные изображения, срезы и анимации. ParaView также обладает интерактивными возможностями для анализа данных в реальном времени и взаимодействия с моделью, что облегчает глубокий анализ результатов.

SALOME Меса является интегрированной средой для предварительной обработки геометрии и настройки расчетной сетки для OpenFOAM. Этот инструмент обеспечивает интуитивный пользовательский интерфейс для создания и манипулирования сложными геометрическими моделями, а также настройки сеток различной структуры. SALOME Меса предоставляет инструменты для проверки качества сетки и ее подготовки к последующим симуляциям в OpenFOAM [?].

В совокупности OpenFOAM, ParaView и SALOME Меса предоставляют мощный комплект инструментов для моделирования и визуализации в области CFD. Они позволяют проводить сложные численные симуляции, анализировать результаты и визуализировать данные, способствуя лучшему пониманию физических процессов и принятию информированных решений в различных областях применения, таких как авиация, автомобильная промышленность, энергетика и др.

## Постановка задачи теплообмена

Уравнение энергии:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (1)$$

Уравнение движения:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

Уравнение состояния:

$$p = \rho R T \quad (3)$$

Уравнение теплового баланса для источника тепла  $Q$ :

$$Q = V \cdot q \quad (4)$$

Граничные условия:

- **Вход воздуховода:**

$$T|_{\text{вход}} = T_{\text{вх}} = 50 \text{ K},$$

$$\mathbf{u}|_{\text{вход}} = (3, 0, 0) \text{ м/с}.$$

- **Выход воздуховода:**

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\text{выход}} = 0,$$

$$p|_{\text{выход}} = 0 \text{ Па}.$$

- **Стенки воздуховода:** Условие прилипания и непроницаемости для скорости, теплоизолированные стенки.

$$\mathbf{u}|_{\text{стенки}} = 0,$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\text{стенки}} = 0.$$

- **На границах между подобластями:** Непрерывность температуры, потоков тепла и скорости.

1. Воздуховод:

$$-150 \leq x \leq 150$$

$$-20 \leq y \leq 30$$

$$10 \leq z \leq 32$$

2. Нагреватель:

$$-7.5 \leq x \leq 17.5$$

$$-7.5 \leq y \leq 17.5$$

$$7.5 \leq z \leq 10$$

3. Подложка радиатора:

$$-10 \leq x \leq 20$$

$$-10 \leq y \leq 20$$

$$10 \leq z \leq 15$$

4. Цилиндр 1:

$$-7.5 \leq x \leq -2.5$$

$$-7.5 \leq y \leq -2.5$$

$$15 \leq z \leq 30$$

5. Цилиндр 2:

$$2.5 \leq x \leq 7.5$$

$$2.5 \leq y \leq 7.5$$

$$15 \leq z \leq 30$$

6. Цилиндр 3:

$$12.5 \leq x \leq 17.5$$

$$12.5 \leq y \leq 17.5$$

$$15 \leq z \leq 30$$

**Начальные условия:**

- **Температура:**

$$- T_0 = 50 \text{ C} \quad (\text{константная по всей области})$$

- **Давление:**

- $p_0 = 0 \text{ Па}$  (константное по всему воздуховоду)

- **Теплоемкость материала ( $C_p$ ):**

- Для меди:  $C_p = 385 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$

- Для воздуха:  $C_p = 1005 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$

- **Плотность материала ( $\rho$ ):**

- Для меди:  $\rho = 8900 \text{ кг}/\text{м}^3$

- Для воздуха:  $\rho = 1.196 \text{ кг}/\text{м}^3$

- **Теплопроводность материала ( $\kappa$ ):**

- Для меди:  $\kappa = 400 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$

- **Вязкость материала ( $\mu$ ):**

- Для воздуха:  $\mu = 1.8 \times 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$

- **Число Прандтля ( $\text{Pr}$ ):**

- Для воздуха:  $\text{Pr} = 0.7$

- **Тепловой поток в источнике ( $q$ ):**

- $q = 1.0 \times 10^7 \text{ Вт}/\text{м}^3$

## Постановка задачи оптимизации

Минимизировать максимальную температуру внутри нагревателя, перемещая цилиндры вдоль оси  $x$ :

$$\min_{x_1, x_2} \max_{(x, y) \in \Omega} T_h(x, y)$$

при условиях:

1. Уравнение теплопроводности для пластины:

$$\frac{\partial^2 T_{fin}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{fin}}{\partial y^2} = 0, \quad (x, y) \in \Omega_{fin}$$

2. Граничные условия для пластины:

$$\begin{aligned} T_{fin}(x, 0) &= T_{\text{duct}}, \quad x \in [0, L] \\ \frac{\partial T_{fin}}{\partial y}(x, H) &= 0, \quad x \in [0, L] \\ \frac{\partial T_{fin}}{\partial x}(0, y) &= \frac{\partial T_{fin}}{\partial x}(L, y) = 0, \quad y \in [0, H] \end{aligned}$$

3. Уравнение теплопроводности для цилиндров:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 T_{c1}}{dx_1^2} &= 0, \quad x_1 \in [x_1 - R, x_1 + R] \\ \frac{d^2 T_{c2}}{dx_2^2} &= 0, \quad x_2 \in [x_2 - R, x_2 + R] \end{aligned}$$

4. Граничные условия для цилиндров:

$$\begin{aligned} T_{c1}(x_1 - R) &= T_{c1}(x_1 + R) = T_h \\ T_{c2}(x_2 - R) &= T_{c2}(x_2 + R) = T_h \end{aligned}$$

5. Условия сопряжения на границе между пластиной и цилиндрами:

$$\begin{aligned} T_{fin}(x, y_1) &= T_{c1}(x), \quad (x, y_1) \in \Gamma_{c1} \\ T_{fin}(x, y_2) &= T_{c2}(x), \quad (x, y_2) \in \Gamma_{c2} \\ \frac{\partial T_{fin}}{\partial y}(x, y_1) &= \frac{dT_{c1}}{dx}(x), \quad (x, y_1) \in \Gamma_{c1} \\ \frac{\partial T_{fin}}{\partial y}(x, y_2) &= \frac{dT_{c2}}{dx}(x), \quad (x, y_2) \in \Gamma_{c2} \end{aligned}$$

6. Ограничения на положение цилиндров:

$$\begin{aligned} -10 &\leq x_1 \leq 20 \\ -10 &\leq x_2 \leq 20 \end{aligned}$$

Здесь  $\Omega_{fin}$  - область пластины,  $\Gamma_{c1}$  и  $\Gamma_{c2}$  - границы контакта между пластиной и цилиндрами,  $L$  и  $H$  - длина и высота пластины,  $R$  - радиус цилиндров,  $y_1$  и  $y_2$  - координаты  $y$  центров цилиндров.



# 1 Данные предыдущего этапа исследования

На предыдущем этапе исследования решалась задача охлаждения нагретого тела с помощью установки радиатора.

В начале проекта геометрия радиатора строилась с использованием графического интерфейса SALOME. Используя интуитивно понятный пользовательский интерфейс, создается геометрия радиатора. Этот этап позволил получить исходную геометрию, которая будет использоваться для последующих анализов.

Затем, для повышения гибкости и автоматизации процесса, был создан скрипт на языке Python, который генерирует геометрию радиатора. В этом скрипте можно устанавливать параметры радиатора, такие как расположение элементов. Это позволяет быстро создавать и изменять различные варианты геометрии радиатора для дальнейшего анализа и оптимизации.

Для исследования применялись три различных варианта геометрии радиатора. Примеры геометрии:

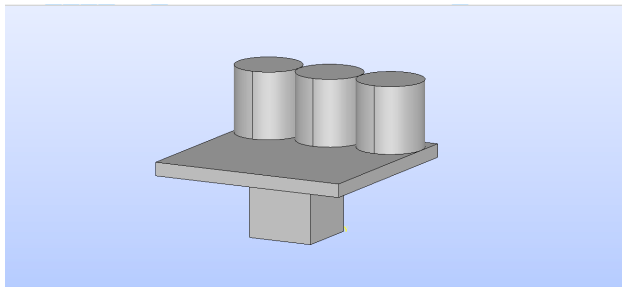


Рис. 1: Модель геометрии 1

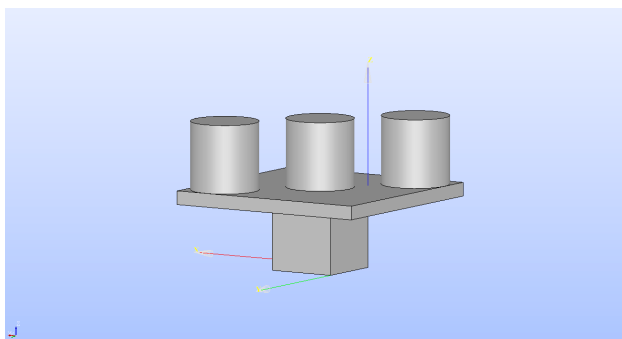


Рис. 2: Модель геометрии 2

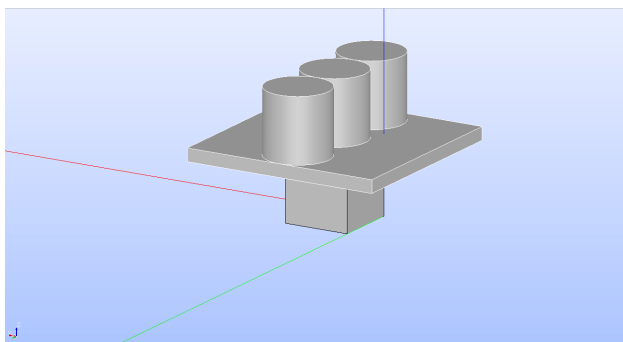


Рис. 3: Модель геометрии 3

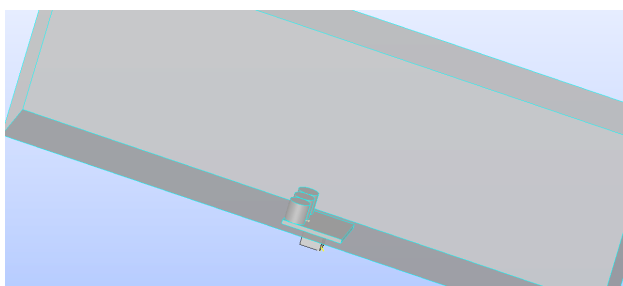


Рис. 4: Модель геометрии 1

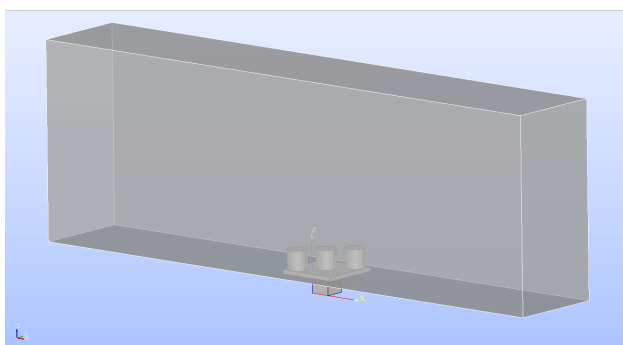


Рис. 5: Модель геометрии 2

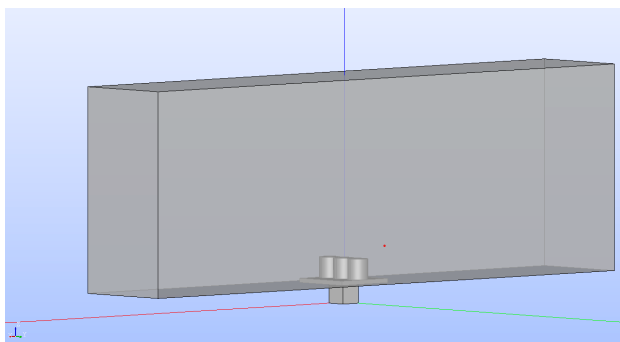


Рис. 6: Модель геометрии 3

В данных моделях части радиатора (3 цилиндрических элемента) являются подвижными и могут быть сдвинуты по оси Ох. Их радиус основания равен 5 мм, а высота 10 мм. Размеры подложки радиатора по ширине и длине 30 мм, а по высоте 2 мм. Нагреватель представляет собой куб с длиной ребра 10 мм и объемной плотностью источников тепла  $2.94 \cdot 10^7$  Вт/³. Скорость потока воздуха 5.6 м/с. Воздух находится в параллелепипеде размерами 300 мм по длине, 50 мм по ширине и 100 мм по высоте. Начальная температура –296.9 К. Параметры материалов приведены в таблице 1 [?].

	Нагреватель	Радиатор	Воздух
Плотность [кг/³]	1280	2700	1.196
Ср [Дж/кг*К]	1004	900	1005
Коэффициент теплопроводности [Вт/м*К]	80	200	
Молекулярная масса [г/моль]	50	27	28.9
Вязкость [кг/м*с]			$1.8 \cdot 10^{-5}$
Число Прандтля			0.7

Таблица 1: Параметры задачи

Затем по модели была построена сетка с уплотнением в области радиатора и нагревателя и произведено разбиение на регионы:

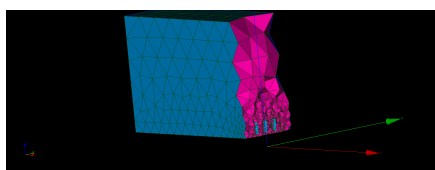


Рис. 7: Сетка модели 1

Для численного решения задачи используется решатель chtMultiRegionFoam. Он применяется для расчета теплообмена между жидкостью/газом и твердым телом. А также для моделирования сложных задач, связанных с теплопередачей и теплообменом в многорегиональных системах [?]. Для каждого региона задавались начальные и граничные условия. Были также заданы дополнительные функции для анализа [?]. Для моделей были получены следующие результаты распределений по температурам:

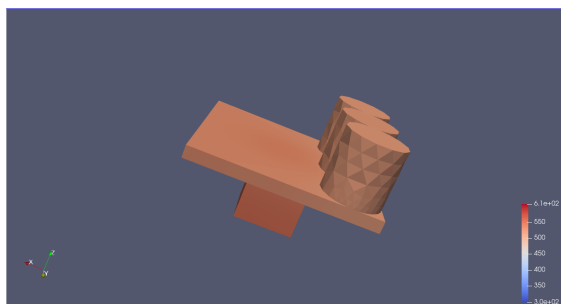


Рис. 8: Распределение температуры для модели 1

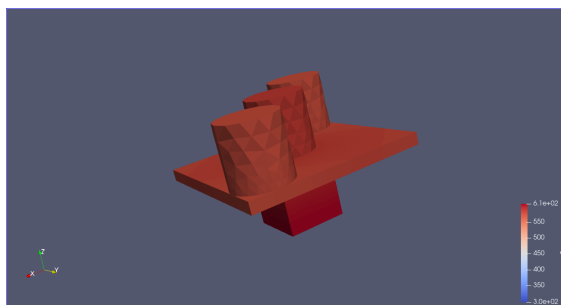


Рис. 9: Распределение температуры для модели 2

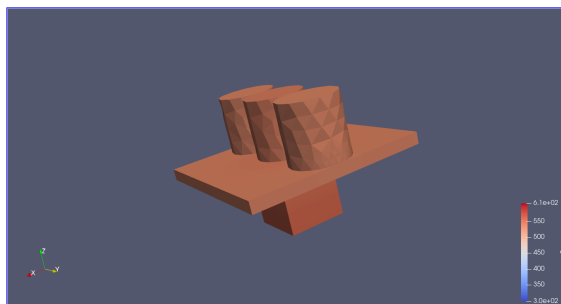


Рис. 10: Распределение температуры для модели 3

Были получены следующие результаты для моделей:

**1. Первая модель:**

- Средняя температура радиатора: 508.381 K
- Средняя температура нагревателя: 533.363 K
- Средняя температура интерфейса между нагревателем и радиатором: 521.537 K

**2. Вторая модель:**

- Средняя температура радиатора: 555.23 K
- Средняя температура нагревателя: 576.306 K
- Средняя температура интерфейса между нагревателем и радиатором: 564.451 K

**3. Третья модель:**

- Средняя температура радиатора: 519.325 K
- Средняя температура нагревателя: 537.741 K
- Средняя температура интерфейса между нагревателем и радиатором: 525.862 K

Построены графики температуры в нагревателе:

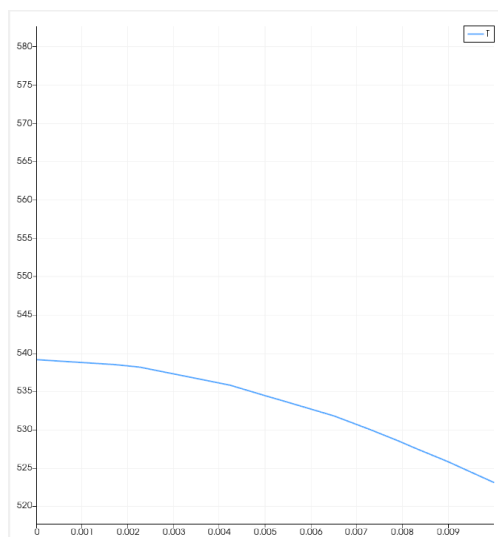


Рис. 11: Распределение температуры в нагревателе для модели 1

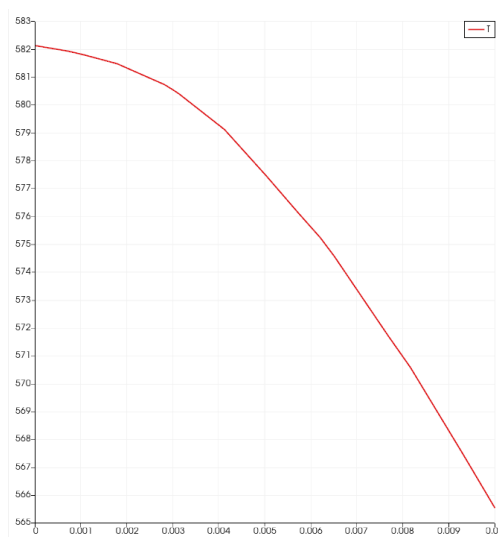


Рис. 12: Распределение температуры в нагревателе для модели 2



Рис. 13: Распределение температуры в нагревателе для модели 3

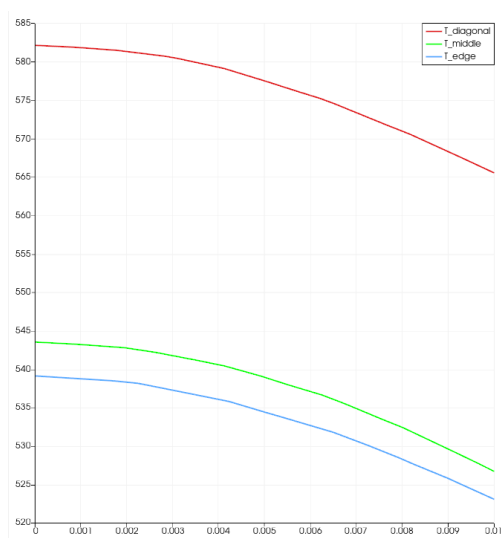


Рис. 14: Распределение температур в нагревателях для всех моделей

Затем было проведено 2000 итераций расчета. Для отслеживания сходимости во время проведения расчета были построены следующие графики (пример для модели 1):

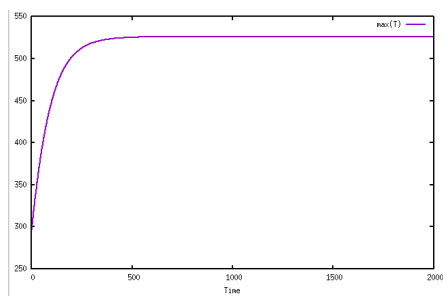


Рис. 15: Зависимость максимальной температуры радиатора от шага

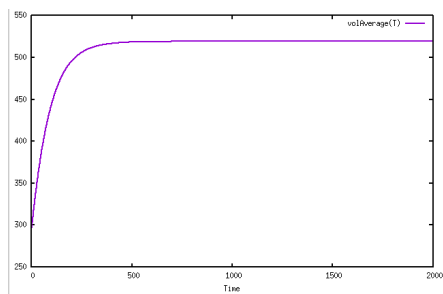


Рис. 16: Зависимость средней температуры радиатора от шага

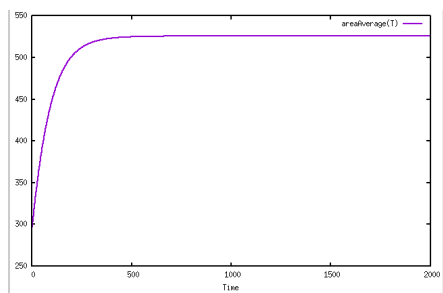


Рис. 17: Зависимость средней температуры интерфейса между нагревателем и радиатором от шага



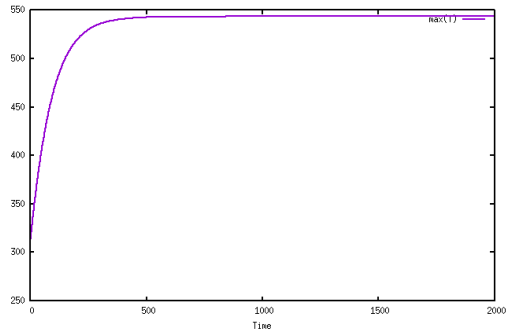


Рис. 18: Зависимость максимальной температуры нагревателя от шага

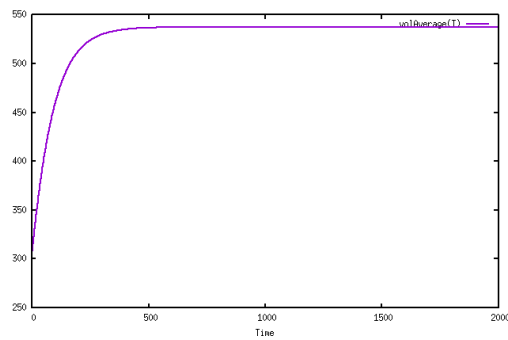


Рис. 19: Зависимость средней температуры нагревателя от шага

Далее были построены графики распределений температуры в центральном сечении:

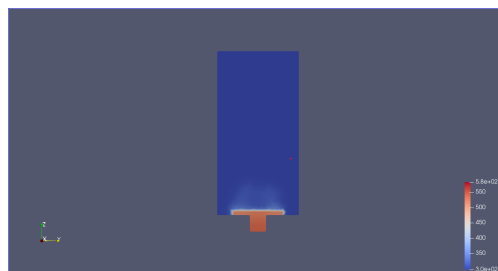


Рис. 20: Распределение температуры для модели 1

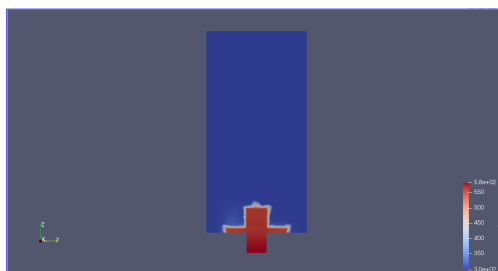


Рис. 21: Распределение температуры для модели 2

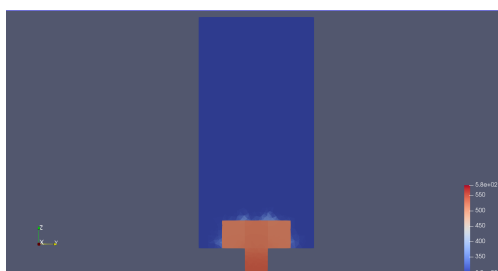


Рис. 22: Распределение температуры для модели 3

А также графики распределений скоростей:



Рис. 23: Распределение скоростей для модели 1

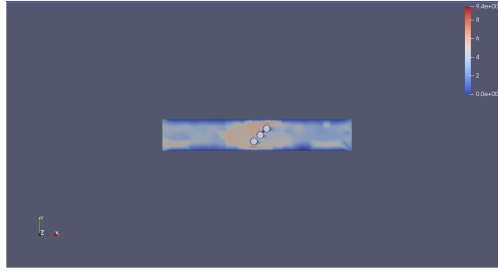


Рис. 24: Распределение скоростей для модели 2

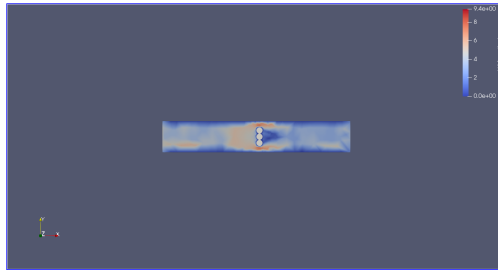


Рис. 25: Распределение скоростей для модели 3

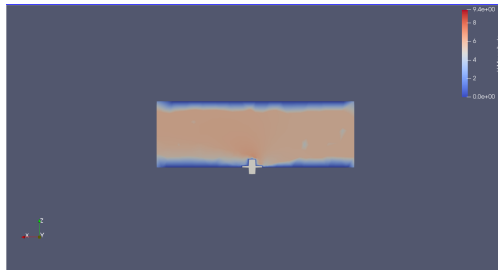


Рис. 26: Распределение скоростей для модели 1

## 2 Проблема с автоматической генерацией сетки в SALOME

В ходе исследования при регенерации геометрии в SALOME, задействовав дамп скрипта, была получена сетка с ошибками из-за нарушения идентификаторов (ID) сущностей.

Для решения данной проблемы был использован Python API в SALOME и применялись следующие методы:

## 2.1 SubShapeAllIDs

Функция `SubShapeAllIDs` в Python API SALOME используется для получения всех идентификаторов (ID) подформ в геометрии. Это полезно, когда необходимо провести операции с каждой подформой в модели.

Пример использования:

```
subshape_ids = geompy.SubShapeAllIDs(main_shape)
print(f"ID подформ: {subshape_ids}")
```

В данном примере `main_shape` - это главная форма в вашей геометрии.

## 2.2 GetShapesOnBoxIDs

Функция `GetShapesOnBoxIDs` возвращает идентификаторы форм, которые содержатся внутри заданного объема, определенного прямоугольным параллелепипедом.

Пример использования:

```
box = geompy.MakeBox(0, 0, 0, 10, 10, 10)
shapes_inside_box_ids = geompy.GetShapesOnBoxIDs(main_shape, box)
print(f"ID форм внутри прямоугольного параллелепипеда: {shapes_inside_box_ids}")
```

Здесь `main_shape` - это опять же главная форма, а `box` - созданный прямоугольный параллелепипед.

## 2.3 GetShapesOnPlaneWithLocationIDs

Функция `GetShapesOnPlaneWithLocationIDs` возвращает идентификаторы форм, которые пересекают заданную плоскость.

Пример использования:

```
plane = geompy.MakePlane(0, 0, 1, 0)
shapes_on_plane_ids = geompy.GetShapesOnPlaneWithLocationIDs(main_shape, plane)
print(f"ID форм, пересекаемых плоскостью: {shapes_on_plane_ids}")
```

В этом примере `main_shape` - главная форма, а `plane` - созданная плоскость [?].

Используя эти методы, получилось стабилизировать процесс генерации сетки, обеспечивая постоянство идентификаторов форм даже при обновлении геометрии. Это решение позволило успешно использовать скрипт в дальнейших этапах исследования.

### 3 Автоматизированный процесс генерации сетки и расчета

На данном этапе работы рассматривается процесс автоматизации генерации сетки в программе SALOME и выполнения расчетов в OpenFOAM для различных комбинаций параметров. Ключевыми параметрами, подлежащими варьированию, являются `shift_first_cylinder` и `shift_second_cylinder`.

Переменная `shift_first_cylinder` представляет собой сдвиг первого цилиндра в радиаторе, а `shift_second_cylinder` — сдвиг второго цилиндра. Эти параметры влияют на геометрию радиатора и, следовательно, на условия теплообмена в системе.

Скрипт создает уникальное имя для каждой комбинации параметров и затем копирует исходный кейс в новую директорию. После этого SALOME запускается в режиме командной строки для выполнения генерации сетки с учетом новой геометрии, заданной параметрами сдвига цилиндров. Далее запускаются соответствующие bash-скрипты для выполнения кейса в OpenFOAM.

После завершения расчета, автоматически извлекаются результаты. Сценарий ищет и анализирует файл с данными теплообмена в постпроцессинговой директории. Это позволяет собирать и систематизировать конечные результаты для каждой конфигурации геометрии. Такой подход обеспечивает эффективный анализ влияния различных параметров на теплоотдачу системы.

### 4 Особенности фиксации и движения цилиндров

Необходимо отметить, что в проведенных исследованиях имелось три цилиндра в системе. Тем не менее, третий цилиндр был зафиксирован в положении  $(0, 0)$ , и двигались только два оставшихся цилиндра. Такой выбор сделан с целью упростить визуализацию и анализ результатов.

Данный подход облегчает анализ и интерпретацию результатов, обеспечивая более ясное представление о влиянии конкретных параметров на эффективность теплообмена в рассматриваемой системе.

## 5 Первые результаты

На основе автоматизированного процесса получены первые результаты, охватывающие 25 точек варьирования параметров. Исследуемые параметры `shift_first_cylinder` и `shift_second_cylinder` изменялись от 0 до 20 с шагом 5. Эти значения представляют различные комбинации сдвигов цилиндров в радиаторе, что отражает влияние геометрических параметров на теплоотдачу системы.

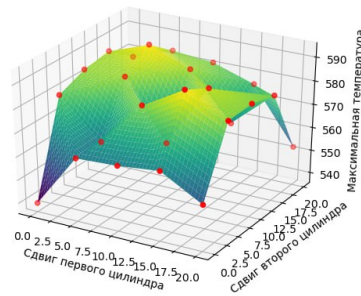


Рис. 27: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров

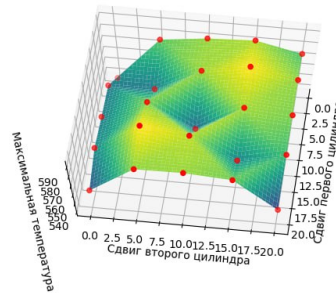


Рис. 28: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров

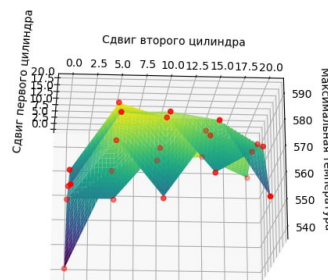


Рис. 29: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров

Для улучшения визуализации и наглядности полученных данных была проведена интерполяция поверхности. Интерполированная поверхность дает представление о поведении системы в пространстве параметров и позволяет выявить области оптимальных значений для исследуемых параметров.

Этот этап анализа предоставляет первичное представление о влиянии сдвига цилиндров на теплообмен в системе.

## 6 Оптимизация процесса расчета

С целью оптимизации процесса расчета для большего количества точек был реализован многопоточный код на языке программирования Python. Для этого был использован модуль `multiprocessing`, который позволяет создавать и управлять параллельными процессами.

Прежде всего, были внесены некоторые изменения в существующий код. Введены параметры `shift_third_cylinder` и `all_data` для адаптации к третьему цилиндру и сбору результатов в разделяемом словаре. Это позволило более гибко настраивать геометрию и эффективно собирать результаты расчетов.

С применением модуля `multiprocessing` была реализована функция `run_simulation`, которая выполняет расчет для каждой комбинации параметров в отдельном процессе. Результаты каждого процесса сохраняются в разделяемом словаре `all_data`, где ключами являются уникальные идентификаторы (например, `_0_0_0`), а значениями — результаты расчетов.

Затем, с использованием библиотеки `Pool` и метода `starmap`, были запущены отдельные процессы для каждой комбинации параметров. Это позволило распараллелить

выполнение расчетов и значительно ускорить процесс.

Итоги расчетов были собраны в разделяемом словаре `all_data`, который после завершения всех процессов может быть использован для анализа и построения интерполяции. Это позволяет обработать большой объем данных более эффективно, особенно при увеличении числа комбинаций параметров для анализа.

## 7 Увеличение количества точек для анализа

Оптимизация процесса расчета с использованием многопоточности значительно повысила эффективность анализа.

Так, на следующем этапе было проведено исследование с шагом 2, что дало 121 точку для анализа. Это уже более подробное и детальное исследование, которое позволяет получить более точные представления о влиянии параметров на характеристики системы.

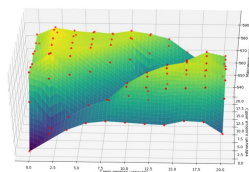


Рис. 30: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров (121 точка)

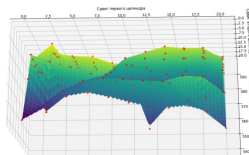


Рис. 31: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров (121 точка)

Затем мы перешли к шагу 1, что привело к анализу 441 точки.



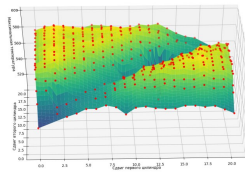


Рис. 32: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров (441 точка)

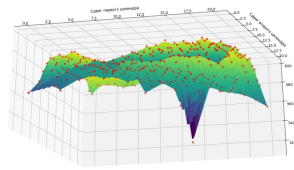


Рис. 33: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров (441 точка)

## 8 Первые результаты и наблюдения

Первые результаты анализа геометрии системы показали интересные закономерности. В частности, было отмечено, что минимумы характеристик системы наблюдаются при равных сдвигах первого и второго цилиндров.

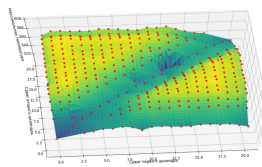


Рис. 34: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров (441 точка)

При равных сдвигах цилиндров они касаются друг друга. Такая конфигурация способствует более эффективному теплообмену между цилиндрами и более равномерному распределению тепловой нагрузки.

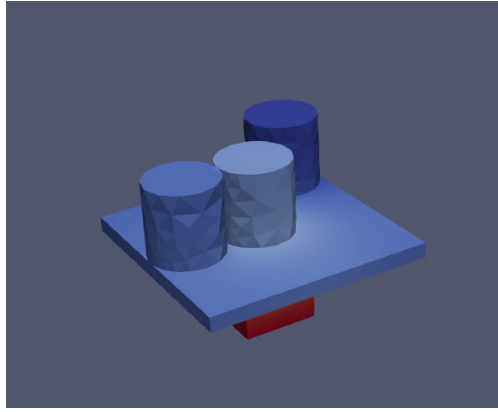


Рис. 35: Геометрия при которой достигается минимальное значение

## 9 Эксперименты с геометрией и анализ результатов

Однако эта геометрия не демонстрировала реальной зависимости между расположением цилиндров и температурой. В ответ на это наблюдение был проведен ряд экспериментов с общей геометрией системы.

В первом эксперименте было решено уменьшить диаметр цилиндров в два раза, сделав их тоньше (2.5 мм). Это привело к тому, что цилиндры перестали касаться друг друга, создавая новые условия для теплообмена. Теперь теплообмен между цилиндрами осуществляется через воздушный зазор.

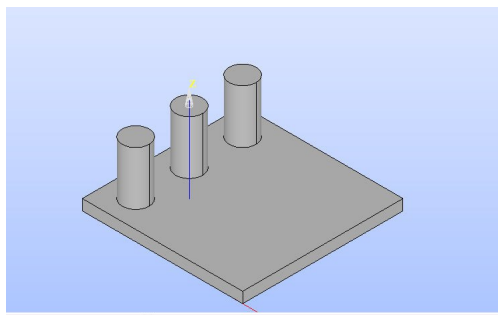


Рис. 36: Новая геометрия

После внесения изменений в геометрию системы были получены более интересные результаты, которые отличаются от предыдущих экспериментов. Новая конфигурация цилиндров более чувствительна к расположению внутри системы, и температурные различия стали более заметными.

Например, можно заметить, что при размещении ближе к центру системы температуры становятся меньше. Это может быть обусловлено более равномерным распреде-

лением тепла в системе и более эффективным теплообменом.

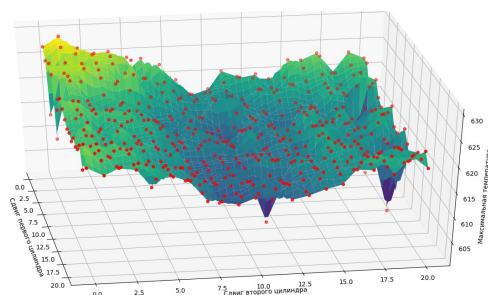


Рис. 37: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров

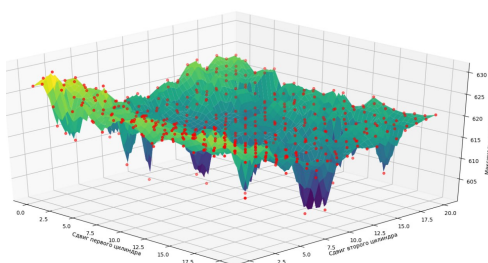


Рис. 38: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров

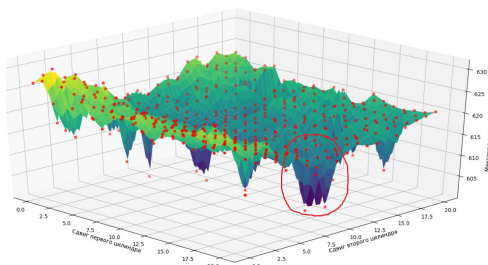


Рис. 39: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров

В ходе экспериментов было обнаружено, что существует оптимальная конфигурация, при которой достигается минимум температуры в системе. Эта конфигурация характеризуется расстановкой цилиндров по диагонали (рис. 38 и 39). Минимум максимальной температуры нагревателя достигается также при данной конфигурации (рис. 40 и 41).

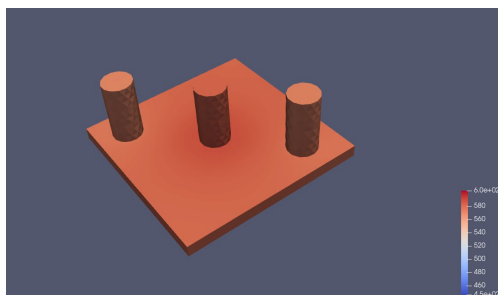


Рис. 40: Пример минимума при новой геометрии

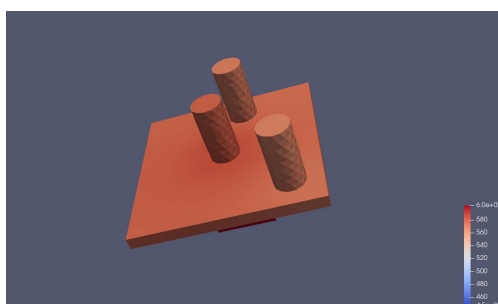


Рис. 41: Пример минимума при новой геометрии

## 10 Оптимизация расчетной сетки

Для более глубокого анализа системы и выявления потенциальных выбросов в температурных данных, было решено оптимизировать расчетную сетку. Используя параметры NETGEN\_3D, уменьшен размер элементов сетки.

Этот подход позволил более детально рассмотреть поведение системы в местах с высокими градиентами температуры и выделить потенциальные выбросы. Результаты показали, что некоторые точки действительно являются выбросами, это может быть связано с особенностями теплового распределения в этих областях.

## 11 Модификация геометрии и уменьшение воздуховода

Далее была проведена серия изменений в геометрии системы. Одним из ключевых моментов стало уменьшение воздуховода практически до минимального зазора в 2 мм

к цилиндрам. Это решение позволило избежать дополнительных условий на границе между воздухопроводом и цилиндрами, создавая более естественные условия для теплового обмена.

С учетом внесенных изменений в геометрию системы и уменьшения воздуховода, проведен новый ряд расчетов и получены результаты, отраженные на рисунках 42 и 43.

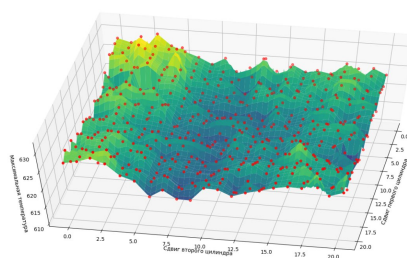


Рис. 42: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров

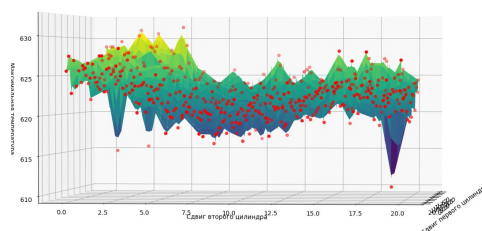


Рис. 43: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров

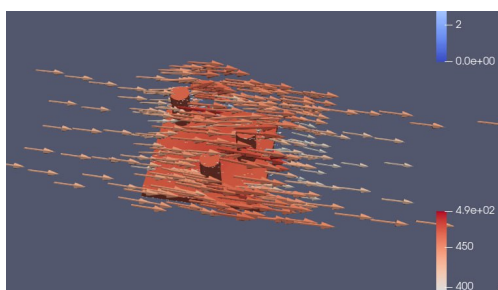


Рис. 44: Скорость течения

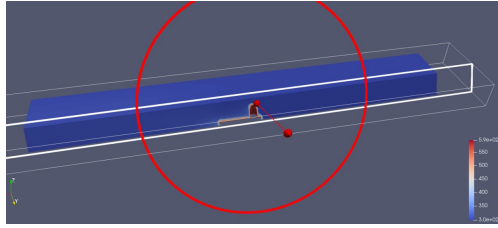


Рис. 45: Новая геометрия

## 12 Анализ реальной системы и изменения параметров

Следующим этапом исследования стал анализ условий, представляющих реальную систему охлаждения. Внесенные изменения включали снижение скорости воздуха внутри воздуховода до 3 м/с (по сравнению с предыдущим значением 5.6 м/с), замену материала радиатора на медь (предыдущий материал - алюминий), а также модификацию геометрии нагревателя, сделав его тоньше и значительно больше по размерам, а саму подложку радиатора сделав толще.

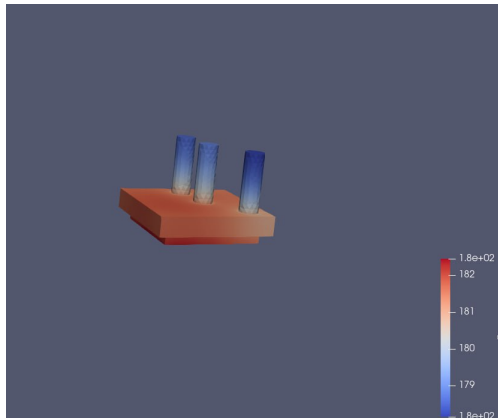


Рис. 46: Измененная геометрия

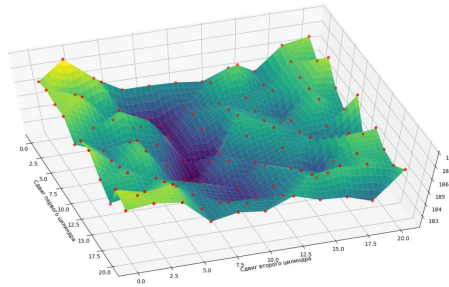


Рис. 47: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров

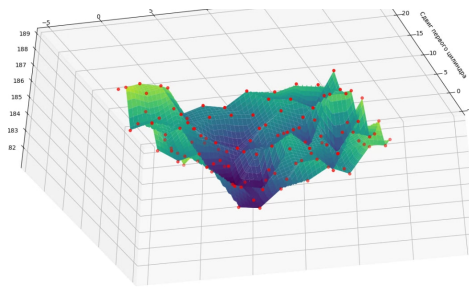


Рис. 48: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров

## 13 Применение эволюционного алгоритма в оптимизации

Необходимо отметить, что для более эффективного и быстрого поиска оптимальных параметров в задаче охлаждения был применен эволюционный алгоритм. Эволюционные алгоритмы — это класс методов оптимизации, вдохновленных процессами биологической эволюции. Они включают в себя механизмы отбора, скрещивания и мутации, а применительно к задачам оптимизации, такие алгоритмы позволяют находить оптимальные решения в пространствах больших размерностей.

Принцип работы эволюционного алгоритма можно кратко описать следующим образом:

1. **Инициализация популяции:** Создается начальная популяция индивидов (наборов параметров) случайным образом или на основе каких-то эвристик.
2. **Оценка приспособленности:** Каждый индивид из популяции оценивается по степени приспособленности в соответствии с целевой функцией. В нашем контексте целевая функция - минимизация максимальной температуры внутри нагрева-

теля.

3. **Отбор:** Выбираются наиболее приспособленные индивиды для следующего поколения. Это может происходить различными методами, такими как турнирный отбор, рулеточный отбор и др.
4. **Скращивание:** Происходит кроссовер (скрещивание) между выбранными индивидами, что приводит к созданию новых индивидов. Это позволяет объединить положительные черты родителей.
5. **Мутация:** Некоторые индивиды могут подвергаться мутациям, изменяя свои параметры с определенной вероятностью. Это вносит элемент случайности и разнообразия в популяцию.
6. **Повторение:** Описанные шаги повторяются в цикле до достижения критерия остановки, такого как заданное количество поколений или достижение требуемой точности.

Эволюционные алгоритмы являются мощным инструментом для оптимизации в больших пространствах параметров, позволяя находить приближенно оптимальные решения в условиях ограниченной информации о системе [?].

Применение эволюционного алгоритма в задаче оптимизации параметров системы охлаждения значительно снизило количество необходимых расчетов. Вместо полного перебора 121 точек в пространстве параметров, алгоритм смог достичь точек минимума всего за 50 расчетов.

## 14 Использование градиентного метода

Помимо дифференциальной эволюции, данная работа включала использование градиентного метода для оптимизации. Градиентные методы широко используются в численной оптимизации для поиска минимума (или максимума) функции. Они базируются на использовании градиента функции (вектора её частных производных) для определения направления поиска оптимального значения. Один из простых градиентных методов - это метод градиентного спуска.

1. Инициализация параметров случайными значениями.



2. Повторение до сходимости (или до достижения максимального числа итераций):

- Вычисление градиента функции по параметрам.
- Обновление параметров в направлении, противоположном градиенту.

Однако метод градиентного спуска может иметь ограничения, такие как сходимость к локальным минимумам или чувствительность к выбору начальных значений параметров [?].

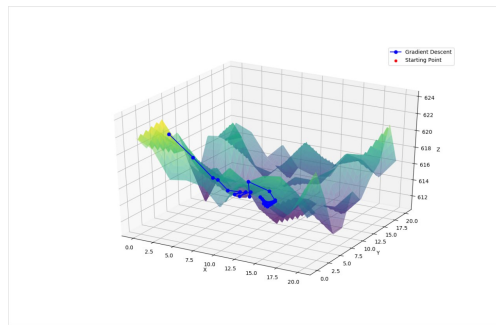


Рис. 49: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров

L-BFGS-B (Limited-memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno with Bound constraints):

L-BFGS-B - это усовершенствованный метод оптимизации, предназначенный для решения задач с ограничениями. Он поддерживает локальную оптимизацию с ограничениями на параметры.

1. Ограничения:

- Метод позволяет оптимизировать функцию с учетом границ (ограничений) для параметров. Это важно, когда некоторые параметры должны оставаться в пределах определенных значений.

2. Лимит памяти:

- "Limited-memory" в названии относится к тому, что метод хранит ограниченное количество предыдущих итераций для оценки гессиана. Это особенно полезно, когда размерность пространства параметров велика.

3. BFGS-подобные обновления:

- Метод L-BFGS-B использует обновления BFGS для оценки обратного гессиана, что позволяет улучшить сходимость метода.

Использование L-BFGS-B может быть предпочтительным, особенно при наличии ограничений на параметры. Этот метод часто применяется в задачах оптимизации, таких как подгонка параметров в статистических моделях или решение задач машинного обучения, где требуется минимизация функции потерь [?].

## Заключение

В ходе данной работы было проведено комплексное исследование системы охлаждения с использованием численных методов и оптимизации. Основные выводы и результаты работы:

1. **Геометрические изменения:** проведен анализ геометрии системы, выполнено исследование влияния расположения цилиндров на эффективность охлаждения. Эксперименты с различными конфигурациями позволили выявить оптимальные расстановки и влияние контакта цилиндров друг с другом на тепловые характеристики.
2. **Оптимизация с использованием полного перебора:** проведена первоначальная оптимизация системы, использован полный перебор, что позволило выявить оптимальные точки в пространстве параметров. Это дало общий обзор зависимостей и минимумов целевой функции.
3. **Многopotочность для улучшения производительности:** в процессе увеличения количества точек в пространстве параметров использовалась многopotочность для оптимизации, что значительно ускорило процесс расчета и позволило нам провести более подробное исследование.
4. **Изменения в геометрии и параметрах системы:** исследовали влияние различных параметров, таких как скорость воздуха и материалы, на эффективность охлаждения. Изменения в геометрии и параметрах системы привели к новым интересным результатам, позволяя лучше понять зависимости и оптимизировать систему.
5. **Эволюционный алгоритм:** применили эволюционный алгоритм для оптимизации системы. Этот метод позволил более эффективно находить точки минимума, снижая количество расчетов по сравнению с полным перебором.
6. **Градиентные методы оптимизации:** использование градиентных методов, таких как L-BFGS-B, добавило эффективность и точность в арсенал оптимизационных методов.
7. **Выводы и перспективы:** на основе результатов исследования необходимо сделать вывод о том, что оптимизация геометрии и параметров системы охлаждения

может существенно повысить ее эффективность. Подход с использованием различных методов оптимизации и численного моделирования предоставляет мощный инструментарий для разработки и улучшения теплоотводящих систем. В будущем возможно проведение более глубоких исследований с учетом дополнительных факторов и условий эксплуатации системы.

## Список литературы

- [1] Introduction to Salome Platform — GUI 9.5.0 documentation. URL: <https://docs.salome-platform.org/latest/gui/GUI/introduction.html>.
- [2] Conjugate heat transfer CFD tutorial for plate fin heat sink. 2020. URL: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.26603.36640>.
- [3] OpenFOAM: User Guide: chtMultiRegionFoam. URL: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-heat-transfer-chtMultiRegionFoam.html>.
- [4] Developer's Documentation — SALOME version 9.11 documentation. URL: <https://docs.salome-platform.org/latest/main/tui.html>.
- [5] Пантелеев Андрей Владимирович. Применение эволюционных методов глобальной оптимизации в задачах оптимального управления детерминированными системами.
- [6] Чернышев Олег и Борисов Аркадий. Сравнительный анализ решения задач оптимизации генетическими и градиентными методами // Transport and Telecommunication. Рига, Латвия, 2007. Т. 8, № 1. С. 40–52.
- [7] Liu Dong C., Nocedal Jorge. On the limited memory BFGS method for large scale optimization // Mathematical Programming. URL: <https://doi.org/10.1007/BF01589116>.

## Приложение А

Проект можно найти на github ([github.com/AlexEsn/FOAM\\_project](https://github.com/AlexEsn/FOAM_project)), где содержатся все скрипты и кейсы.