

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

ИНСТИТУТ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ КИБЕРНЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
КАФЕДРА №31 ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА

На правах рукописи

УДК вписать УДК

ЕСИС АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ

ГЕНЕРАТИВНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ КАНАЛЬНОГО
РАДИАТОРА

Выпускная квалификационная работа бакалавра

Направление подготовки 01.03.02 «Прикладная математика и информатика»

Выпускная квалификационная
работа защищена

«___» _____ 20__ г.

Оценка _____

Секретарь ГЭК _____ ЧМЫХОВ М.А.

г. Москва 2024

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к выпускной квалификационной работе на тему:

ГЕНЕРАТИВНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ КАНАЛЬНОГО РАДИАТОРА

Студент–дипломник _____ Есис А.И.

Руководитель проекта _____ к.ф.-м.н., доцент Чмыхов М.А.

Консультант _____ д.ф.-м.н., профессор Василевский–Коган В.В.

Рецензент _____ к.ф.-м.н., доцент Пельмень П.П.

Зав. кафедрой №31 _____ д.ф.-м.н., профессор Кудряшов Н.А.

Содержание

Введение	4
1 Постановка задачи	5
1.1 Математическая модель процесса теплообмена	5
1.1.1 Уравнение энергии:	5
1.1.2 Уравнение состояния:	5
1.1.3 Граничные условия:	5
1.1.4 Начальные условия:	7
1.2 Постановка задачи оптимизации	7
1.3 Первый этап исследования	9
1.4 Автоматическая генерация сетки в SALOME	19
1.4.1 SubShapeAllIDs	19
1.4.2 GetShapesOnBoxIDs	20
1.4.3 GetShapesOnPlaneWithLocationIDs	20
1.5 Автоматизированный пайплайн для генерации сетки, расчета и аналитики	20
1.6 Особенности фиксации и движения цилиндров	21
1.7 Первые результаты	21
1.8 Оптимизация процесса расчета	22
1.9 Увеличение количества точек для анализа	23
1.10 Результаты и наблюдения автоматической генерации и переборов вариантов	23
1.11 Эксперименты с геометрией и анализ результатов	24
1.12 Оптимизация расчетной сетки	26
1.13 Модификация геометрии и уменьшение воздуховода	26
1.14 Анализ реальной системы и изменения параметров	27
1.15 Применение эволюционного алгоритма в оптимизации	28
1.16 Использование градиентного метода	30

Введение

Актуальность задачи эффективного охлаждения вычислительных систем и электронных устройств становится все более значимой в связи с постоянным ростом их мощности и миниатюризацией. Увеличение производительности вычислительных систем, развитие электромобилей [1] и стремление к энергосбережению требуют разработки компактных и высокоэффективных систем охлаждения. Неэффективное решение проблемы теплоотвода может привести к перегреву, снижению производительности и даже повреждению техники. Целью данного исследования является разработка и оптимизация геометрии радиатора для водяной системы охлаждения процессора с использованием методов вычислительной гидродинамики (CFD). Для достижения поставленной цели были использованы программные пакеты SALOME [2], OpenFOAM и решатель chtMultiRegionFoam [3]. Первым этапом работы было создание базовой геометрии и расчетной сетки в графическом интерфейсе SALOME. Затем по полученной сетке проводилось численное моделирование с использованием OpenFOAM для оценки параметров каждой конструкции. В качестве целевой функции оптимизации была выбрана функция, учитывающая общую теплопередачу и перепад давления [4]. Входными параметрами оптимизации являлись значения заполнения доменов, причем каждая новая геометрия генерировалась автоматически с использованием скрипта на Python. Для решения задачи оптимизации были применены и сравнены два алгоритма: эволюционный (генетический) и градиентный (BFGS) [5]. Результаты показали, что генетический алгоритм эффективнее справляется с глобальной оптимизацией в многомерных пространствах параметров, используя на 30-40% меньше итераций [6]. Проведенное исследование подтвердило, что оптимизация геометрии и параметров системы охлаждения позволяет повысить ее эффективность на 7-10% по сравнению с традиционными конструкциями, имеющими линейное и шахматное расположение элементов. Полученные результаты могут быть использованы для разработки и улучшения радиаторов в различных инженерных областях, где необходим эффективный теплоотвод.

1. Постановка задачи

1.1 Математическая модель процесса теплообмена

1.1.1 Уравнение энергии:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (1.1)$$

Уравнение движения:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1.2)$$

1.1.2 Уравнение состояния:

$$p = \rho R T \quad (1.3)$$

Уравнение теплового баланса для источника тепла Q :

$$Q = V \cdot q \quad (1.4)$$

1.1.3 Граничные условия:

- Выход 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:

$$12.5 \leq x \leq 17.5$$

$$12.5 \leq y \leq 17.5$$

$$15 \leq z \leq 30$$

1.1.4 Начальные условия:

- **Температура:**

- $T_0 = 50 \text{ C}$ (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 (ρ):**

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

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

- **Теплопроводность материала (κ):**

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

- **Вязкость материала (μ):**

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

- **Число Прандтля (Pr):**

- Для воздуха: $Pr = 0.7$

- **Тепловой поток в источнике (q):**

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

1.2 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:

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

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:

$$-10 \leq x_1 \leq 20$$

$$-10 \leq x_2 \leq 20$$

Здесь Ω_{fin} - область пластины, Γ_{c1} и Γ_{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.

1.3 Первый этап исследования

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

Геометрия радиатора строилась с использованием графического интерфейса SALOME. 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:

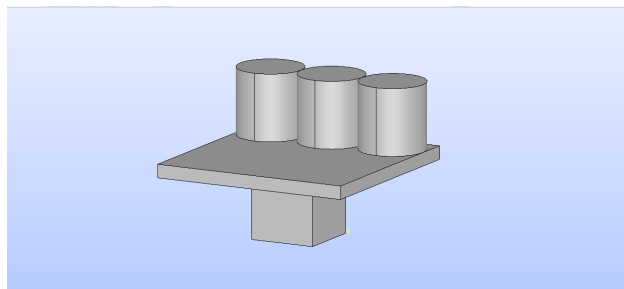


Рис. 1.1: Модель геометрии 1

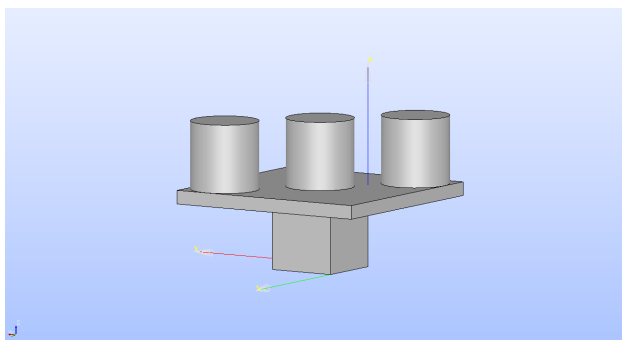


Рис. 1.2: Модель геометрии 2

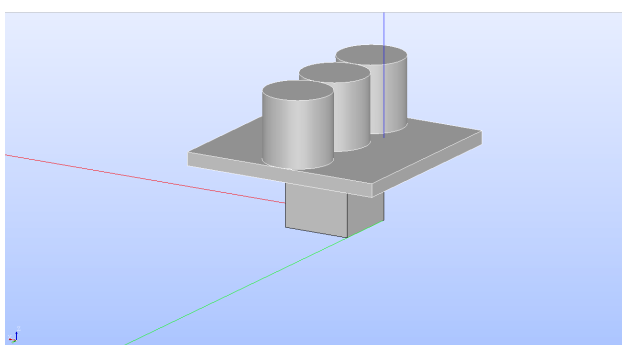


Рис. 1.3: Модель геометрии 3

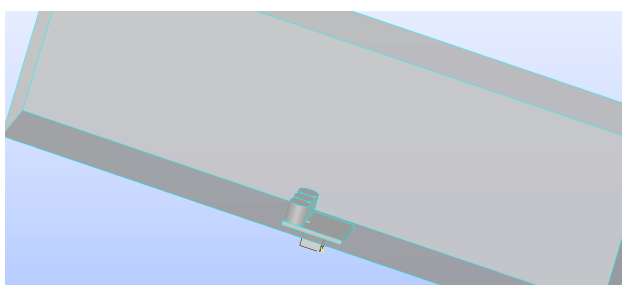


Рис. 1.4: Модель геометрии 1

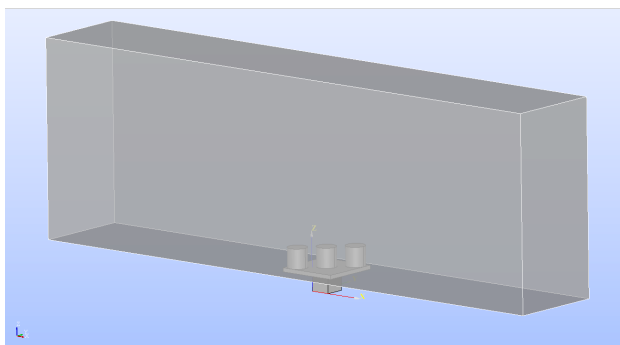


Рис. 1.5: Модель геометрии 2

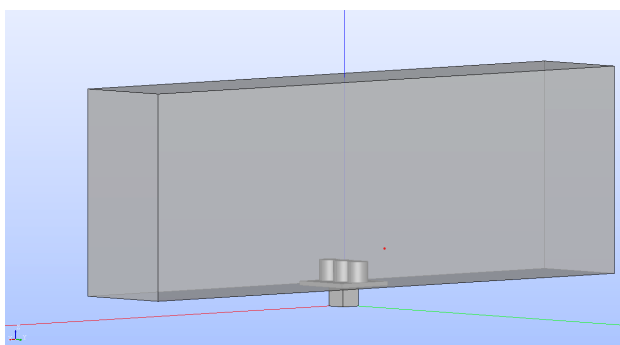


Рис. 1.6: Модель геометрии 3

В данных моделях части радиатора (3 цилиндрических элемента) являются подвижными и могут быть сдвинуты по оси Ox . 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 [7].

	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 1.1: Параметры задачи

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

Для численного решения задачи используется решатель chtMultiRegionFoam. Он

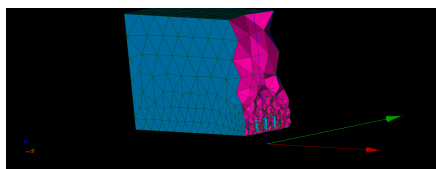


Рис. 1.7: Сетка модели 1

применяется для расчета теплообмена между жидкостью/газом и твердым телом. А также для моделирования сложных задач, связанных с теплопередачей и теплообменом в многорегиональных системах [3]. Для каждого региона задавались начальные и граничные условия. Были также заданы дополнительные функции для анализа [7]. Для моделей были получены следующие результаты распределений по температурам:

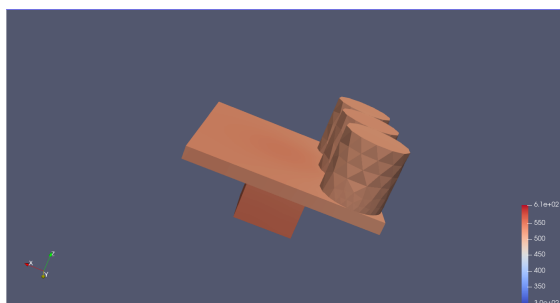


Рис. 1.8: Распределение температуры для модели 1

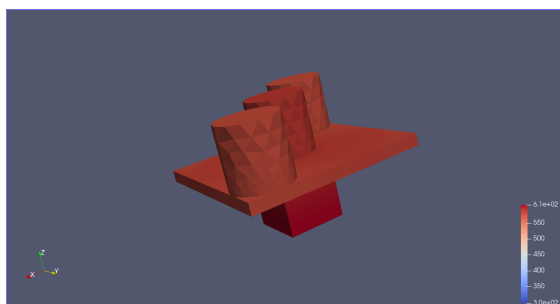


Рис. 1.9: Распределение температуры для модели 2

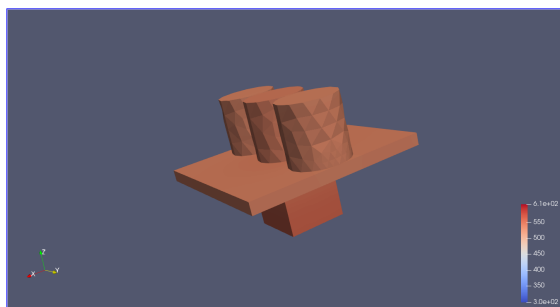


Рис. 1.10: Распределение температуры для модели 3

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:

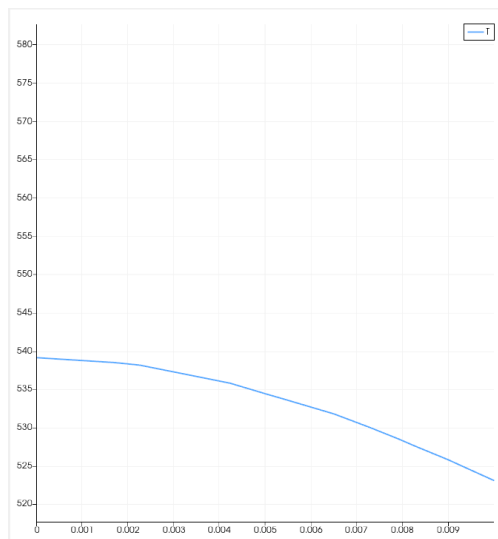


Рис. 1.11: Распределение температуры в нагревателе для модели 1



Рис. 1.12: Распределение температуры в нагревателе для модели 2



Рис. 1.13: Распределение температуры в нагревателе для модели 3

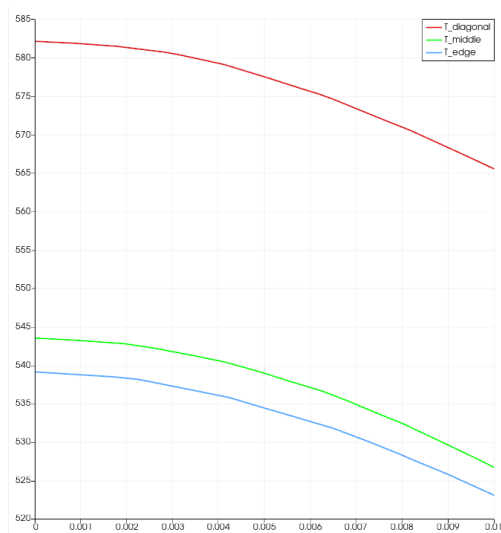


Рис. 1.14: Распределение температур в нагревателях для всех моделей

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

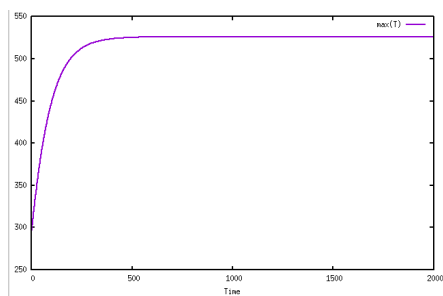


Рис. 1.15: Зависимость максимальной температуры радиатора от шага

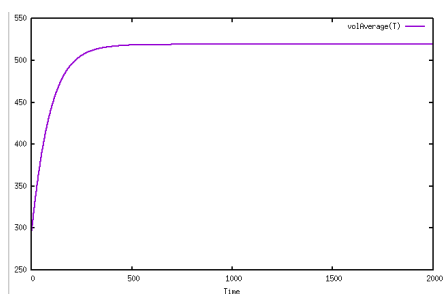


Рис. 1.16: Зависимость средней температуры радиатора от шага

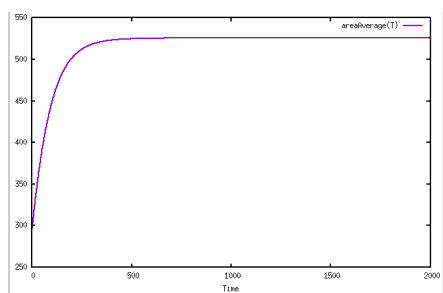


Рис. 1.17: Зависимость средней температуры интерфейса между нагревателем и радиатором от шага

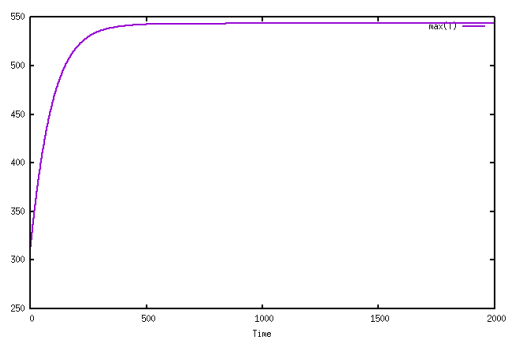


Рис. 1.18: Зависимость максимальной температуры нагревателя от шага

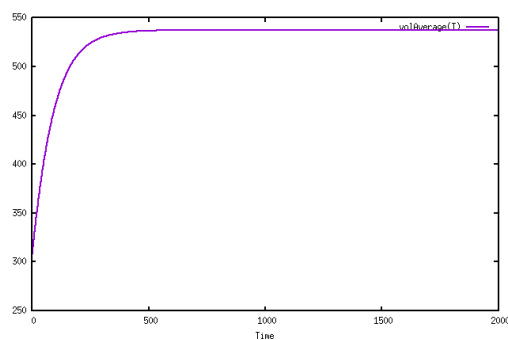


Рис. 1.19: Зависимость средней температуры нагревателя от шага

Далее были построены графики распределений температуры в центральном сечении:

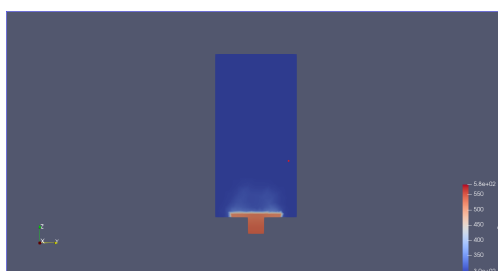


Рис. 1.20: Распределение температуры для модели 1

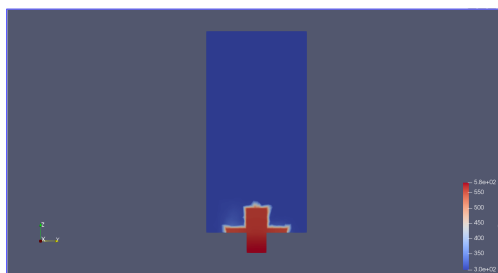


Рис. 1.21: Распределение температуры для модели 2

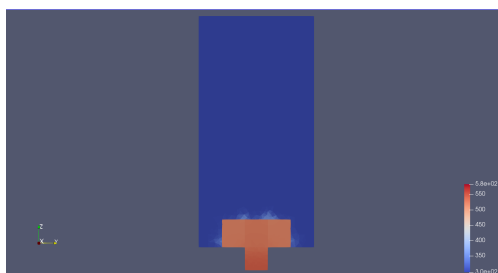


Рис. 1.22: Распределение температуры для модели 3

А также графики распределений скоростей:



Рис. 1.23: Распределение скоростей для модели 1



Рис. 1.24: Распределение скоростей для модели 2

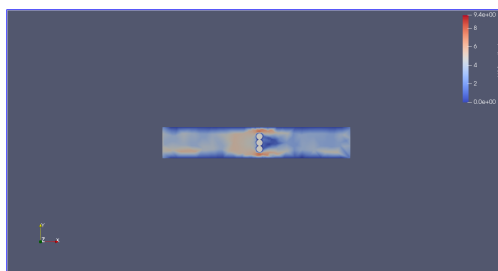


Рис. 1.25: Распределение скоростей для модели 3

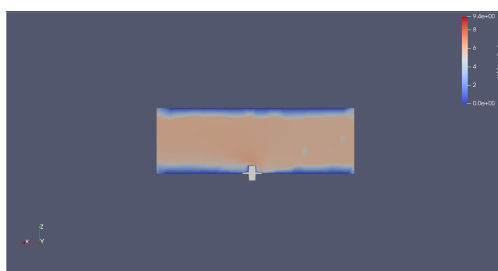


Рис. 1.26: Распределение скоростей для модели 1

1.4 Автоматическая генерация 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:

1.4.1 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.

1.4.2 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.

1.4.3 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 [8].

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.

1.5 Автоматизированный пайплайн для генерации сетки, расчета и аналитики

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.

1.6 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.

1.7 Первые результаты

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

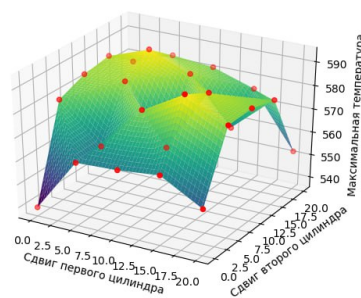


Рис. 1.27: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров

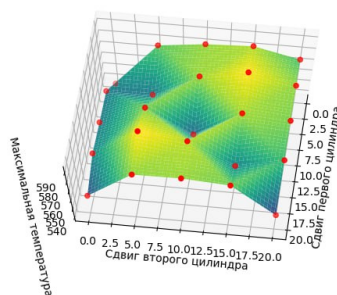


Рис. 1.28: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров

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.

1.8 Оптимизация процесса расчета

Для оптимизации расчета множества точек был создан многопроцессорный код на языке программирования Python. Данное решение позволяет эффективно использовать ресурсы современных многоядерных процессоров, распределяя задачи между процессами и выполняя их параллельно. Многопроцессорный подход обеспечивает лучшую производительность и масштабируемость по сравнению с многопоточностью, так как процессы работают в отдельных адресных пространствах и не делят общую память, что избавляет от проблем синхронизации и блокировок. Реализация выполнена с помощью модуля multiprocessing. Ключевая функция

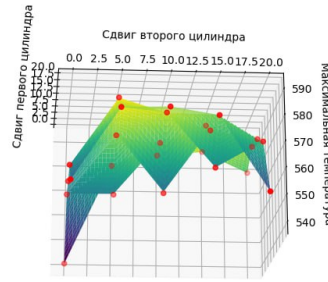


Рис. 1.29: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров

`run_simulation(), all_data, , 0.00, .all_data multiprocessing.Manager, multiprocessing.Pool startmap.run`

1.9 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.

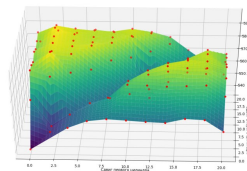


Рис. 1.30: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров (121 точка)

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

1.10 Результаты и наблюдения автоматической генерации и перебора вариантов

Первые результаты анализа геометрии системы показали интересные закономерности. В частности, было отмечено, что минимумы характеристик системы наблюдаются

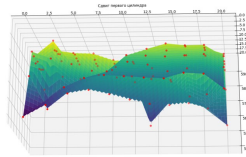


Рис. 1.31: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров (121 точка)

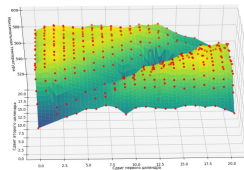


Рис. 1.32: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров (441 точка)

при равных сдвигах первого и второго цилиндров.

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

1.11 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.

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 темпера-

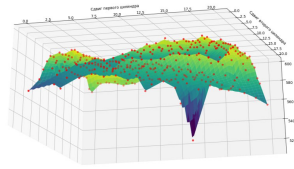


Рис. 1.33: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров (441 точка)

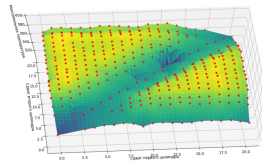


Рис. 1.34: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров (441 точка)

туры становятся меньше. Это может быть обусловлено более равномерным распределением тепла в системе и более эффективным теплообменом.

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).

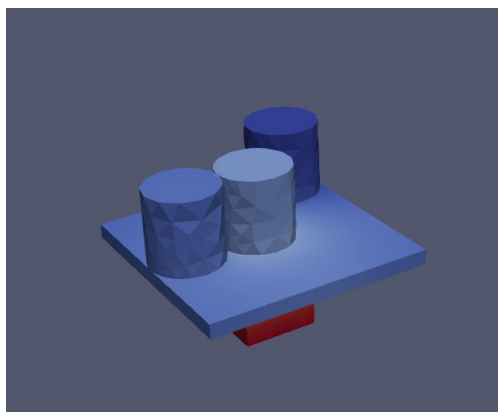


Рис. 1.35: Геометрия при которой достигается минимальное значение

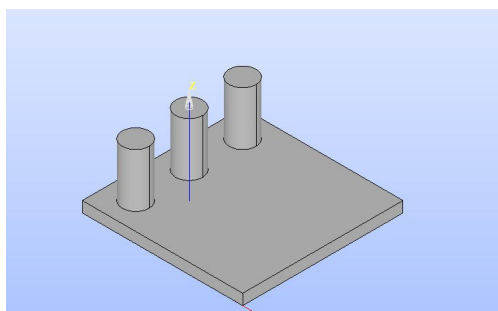


Рис. 1.36: Новая геометрия

1.12 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.

1.13 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.

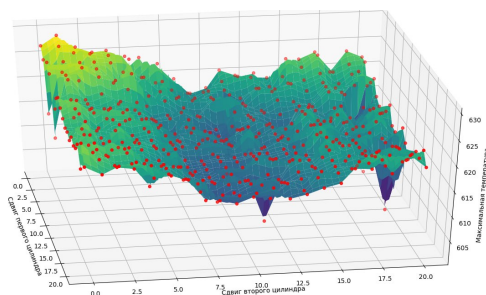


Рис. 1.37: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров

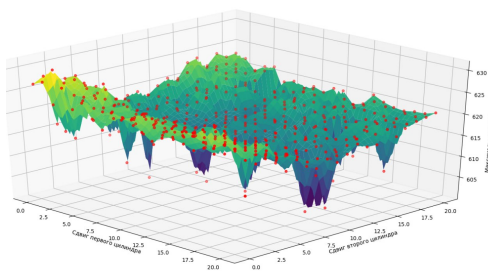


Рис. 1.38: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров

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

1.14 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.

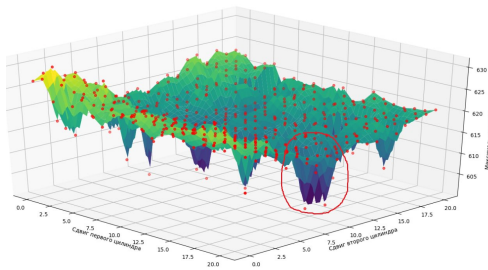


Рис. 1.39: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров

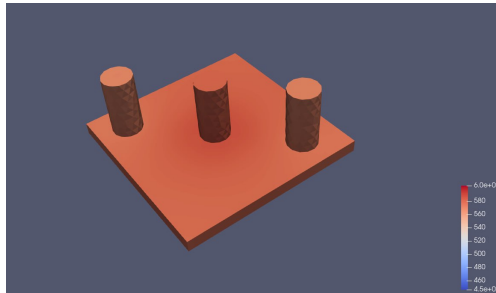


Рис. 1.40: Пример минимума при новой геометрии

1.15 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 нагревателя.
3. **Отбор:** Выбираются наиболее приспособленные индивиды для следующего поколения. Это может происходить различными методами, такими как турнирный

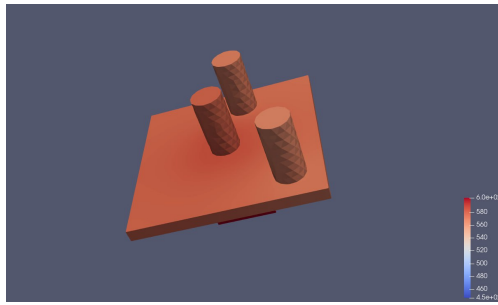


Рис. 1.41: Пример минимума при новой геометрии

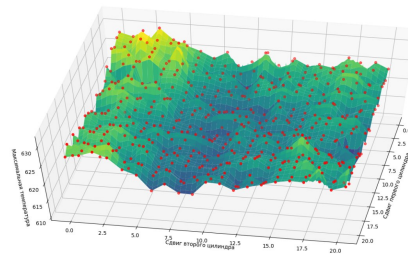


Рис. 1.42: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров

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 [9].

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.

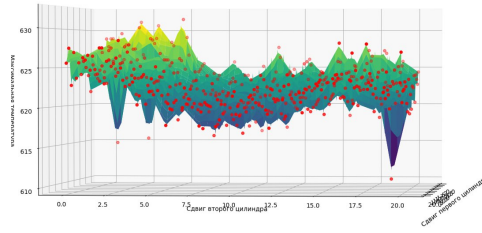


Рис. 1.43: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров

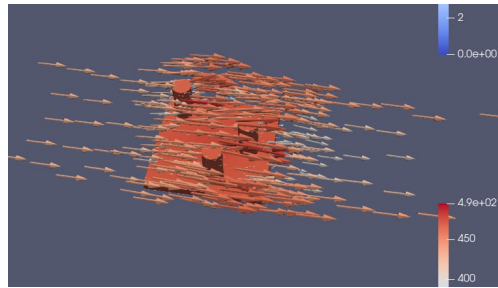


Рис. 1.44: Скорость течения

1.16 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 [6].

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

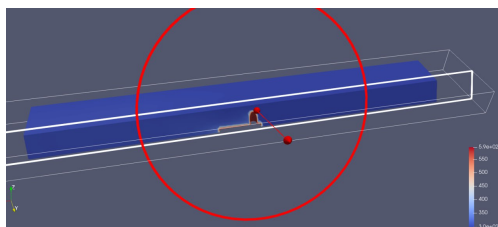


Рис. 1.45: Новая геометрия

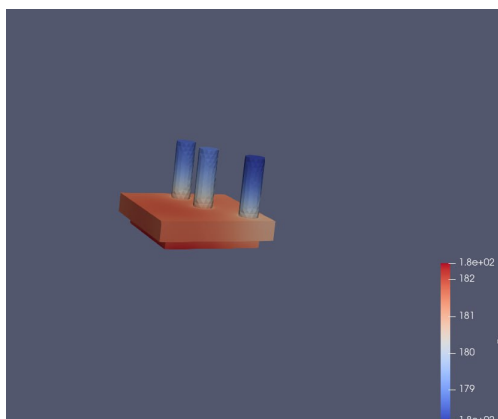


Рис. 1.46: Измененная геометрия

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.

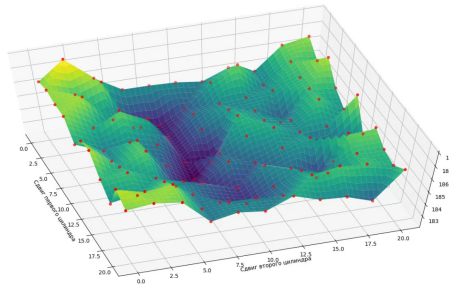


Рис. 1.47: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров

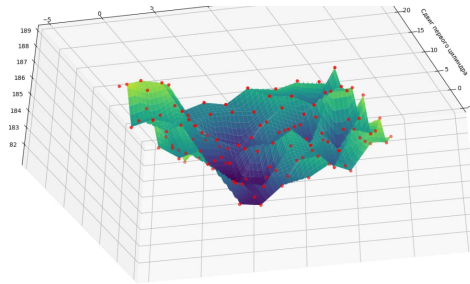


Рис. 1.48: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров

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 [5].

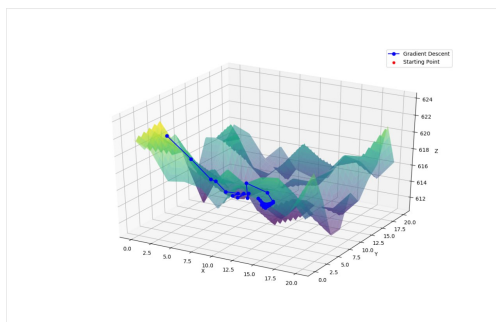


Рис. 1.49: Зависимость максимальной температуры нагревателя от сдвигов цилиндров

Переход к доменному заполнению

Следующим этапом стало доменное заполнение геометрии радиатора, для этого вся площадка радиатора была разделена на 36 частей.

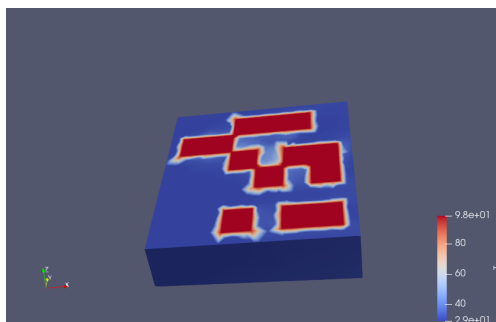


Рис. 1.50: Доменная геометрия распределение температуры

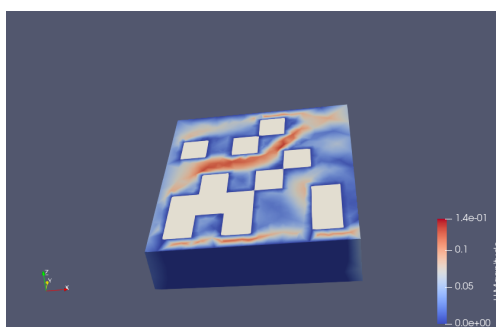


Рис. 1.51: Доменная геометрия распределение скорости потока

Использование API ParaView для создания анимации

На данном этапе использовалось API ParaView, с его помощью автоматизировался процесс анализа и визуализации полученных данных. Код представлен в приложении.

Изменение входного и выходного отверстия

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. **Многопоточность для улучшения производительности:** в процессе увеличения количества точек в пространстве параметров использовалась многопоточность 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. Analysis of Heat Dissipation Performance of Battery Liquid Cooling Plate Based on Bionic Structure / Bo Li, Wenhao Wang, Shaoyi Bei [и др.]. Т. 14, № 9. С. 5541. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/9/5541>.
2. Introduction to Salome Platform — GUI 9.5.0 documentation. URL: <https://docs.salome-platform.org/latest/gui/GUI/introduction.html>.
3. OpenFOAM: User Guide: chtMultiRegionFoam. URL: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-heat-transfer-chtMultiRegionFoam.html>.
4. Mekki Bashir S., Langer Joshua, Lynch Stephen. Genetic algorithm based topology optimization of heat exchanger fins used in aerospace applications. Т. 170. С. 121002. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931021001058>.
5. Liu Dong C., Nocedal Jorge. On the limited memory BFGS method for large scale optimization // Mathematical Programming. URL: <https://doi.org/10.1007/BF01589116>.
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. Conjugate heat transfer CFD tutorial for plate fin heat sink. 2020. URL: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.26603.36640>.
8. Developer's Documentation — SALOME version 9.11 documentation. URL: <https://docs.salome-platform.org/latest/main/tui.html>.
9. Пантелеев Андрей Владимирович. Применение эволюционных методов глобальной оптимизации в задачах оптимального управления детерминированными системами.

Приложение А

Проект можно найти на github (github.com/AlexEsn/FOAM_project), где содержатся все скрипты и кейсы.