

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

Данная работа посвящена исследованию и оптимизации формы радиатора с применением трех программных инструментов: OpenFOAM, ParaView и SALOME Меса. Целью исследования является повышение эффективности радиатора путем оптимизации его геометрии.

В начале исследования используется SALOME Меса для построения геометрии и сетки радиатора. На втором этапе проводятся численные симуляции с использованием OpenFOAM. В результате симуляций получаются данные о тепловом и газодинамическом поведении радиатора. Наконец, результаты численных симуляций визуализируются с помощью ParaView. И делается вывод о наиболее оптимальной форме радиатора.

# Содержание

1	Введение	4
2	Основная часть	5
3	Заключение	16
4	Приложение А	18
5	Приложение Б	19

# 1 Введение

OpenFOAM, ParaView и SALOME Меса являются мощными программными инструментами, широко применяемыми в области вычислительной гидрогазодинамики (CFD) и численного моделирования. Вместе они предоставляют 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) является свободным и открытым программным обеспечением для решения уравнений Навье-Стокса и других математических моделей, связанных с течением жидкостей и газов. OpenFOAM предоставляет широкий спектр методов решения, таких как конечно-разностные, конечно-объемные и конечно-элементные, что позволяет исследовать различные типы потоков и применять разные физические модели. Будучи свободно распространяемым и расширяемым, OpenFOAM предоставляет возможность настраивать и адаптировать код под конкретные задачи и требования.

ParaView является инструментом, который позволяет визуализировать результаты численных симуляций. Он предоставляет широкий спектр функций для создания визуализаций, включая 2D и 3D графику, построение контуров, срезов и анимаций. ParaView также поддерживает интерактивное взаимодействие с моделью, что позволяет анализировать данные в реальном времени, изменять параметры симуляции и осуществлять глубокий анализ результатов.

SALOME Меса является интегрированной средой для предварительной обработки геометрии и настройки расчетной сетки для OpenFOAM. Он предоставляет интуитивный пользовательский интерфейс, который облегчает создание и манипулирование сложными геометрическими моделями, а также настройку сеток с различной структурой. SALOME Меса также предлагает набор инструментов для проверки качества сетки и подготовки ее к последующим симуляциям в OpenFOAM [1].

Вместе OpenFOAM, ParaView и SALOME Меса образуют мощный комплект инструментов для моделирования и визуализации в области вычислительной гидрогазодинамики. Они предоставляют возможность проводить сложные численные симуляции, анализировать результаты и визуализировать данные, что помогает в понимании физических процессов и принятии информированных решений в различных областях, таких как авиация, автомобильная промышленность, энергетика и многое другое.

## 2 Основная часть

В данном проекте исследуется задача охлаждения нагретого тела с помощью установки радиатора.

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

Затем, для повышения гибкости и автоматизации процесса, создается 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 были использованы три различных варианта геометрии радиатора. Примеры геометрии:

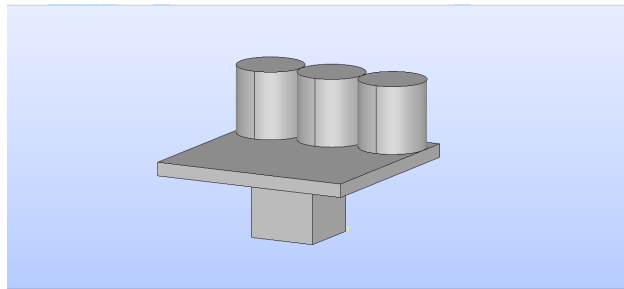


Рис. 1: Модель геометрии 1

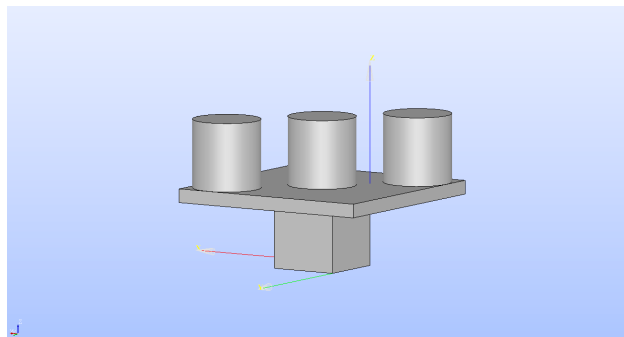


Рис. 2: Модель геометрии 2

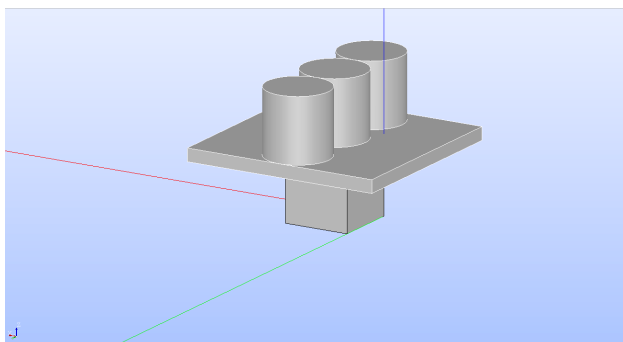


Рис. 3: Модель геометрии 3

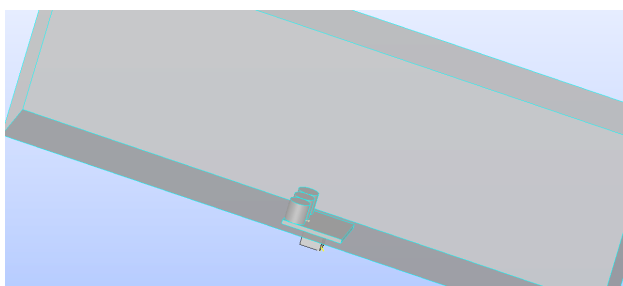


Рис. 4: Модель геометрии 1

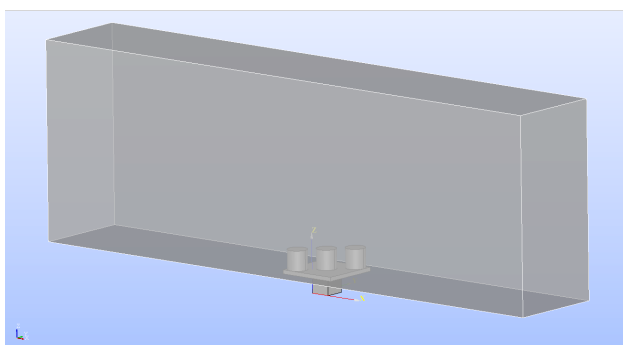


Рис. 5: Модель геометрии 2

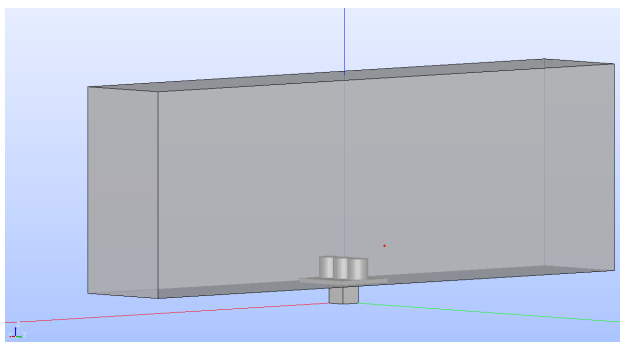


Рис. 6: Модель геометрии 3

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/м<sup>3</sup>. 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 [2].

	Нагреватель	Радиатор	Воздух
Плотность [кг/м <sup>3</sup> ]	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:

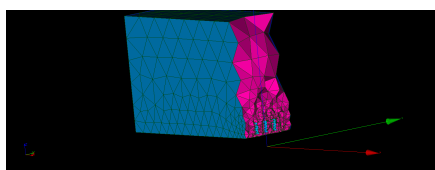


Рис. 7: Сетка модели 1

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 [3]. Для каждого региона задавались начальные и граничные условия. Были также заданы дополнительные функции для анализа [2]. Для моделей были получены следующие результаты распределений по температурам:

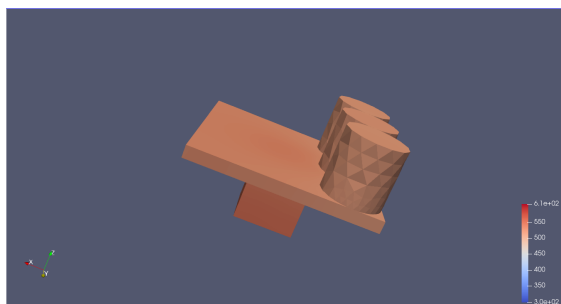


Рис. 8: Распределение температуры для модели 1

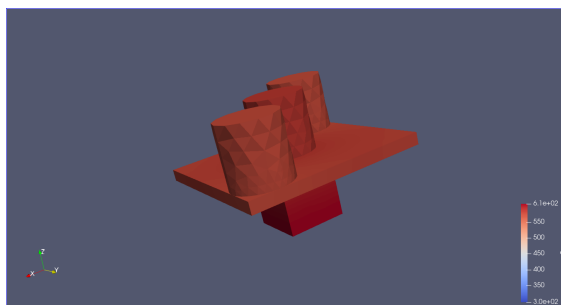


Рис. 9: Распределение температуры для модели 2

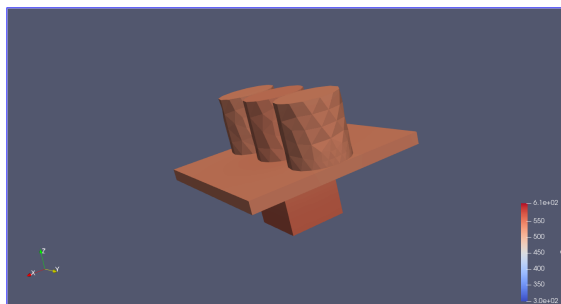


Рис. 10: Распределение температуры для модели 3



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:

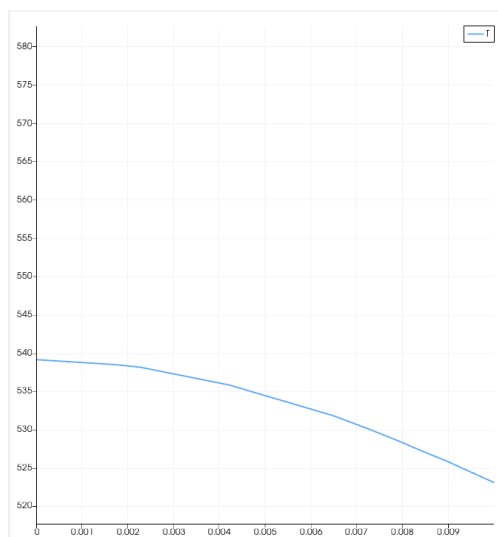


Рис. 11: Распределение температуры в нагревателе для модели 1

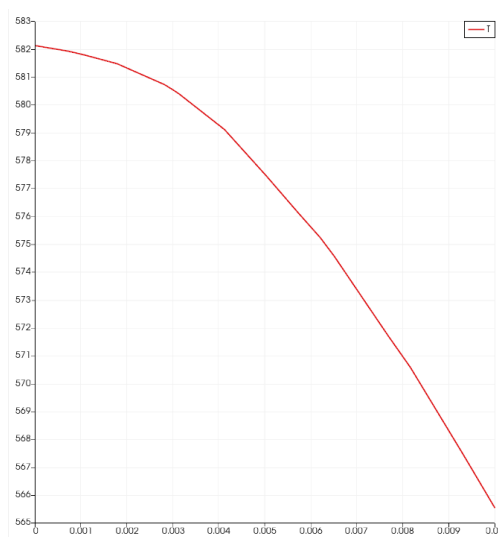


Рис. 12: Распределение температуры в нагревателе для модели 2



Рис. 13: Распределение температуры в нагревателе для модели 3

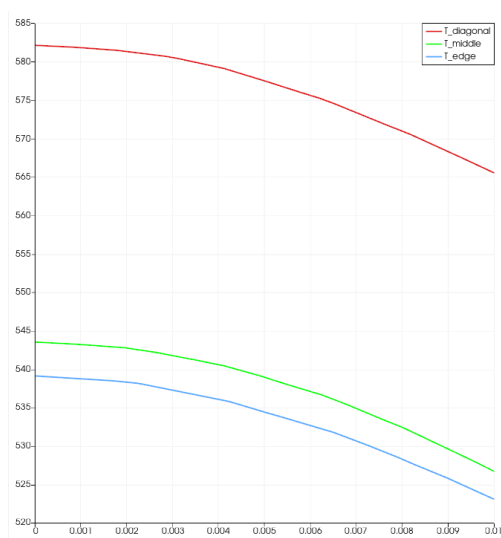


Рис. 14: Распределение температур в нагревателях для всех моделей

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

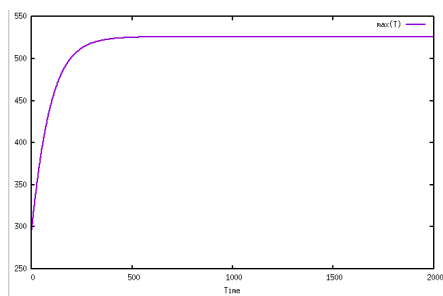


Рис. 15: Зависимость максимальной температуры радиатора от шага

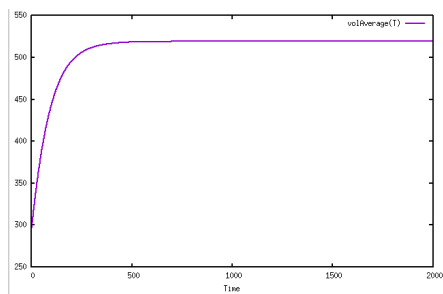


Рис. 16: Зависимость средней температуры радиатора от шага

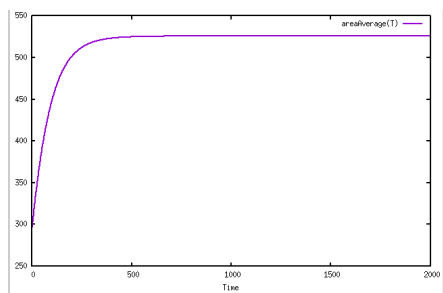


Рис. 17: Зависимость средней температуры интерфейса между нагревателем и радиатором от шага

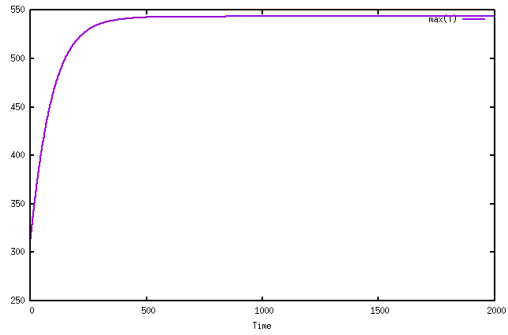


Рис. 18: Зависимость максимальной температуры нагревателя от шага

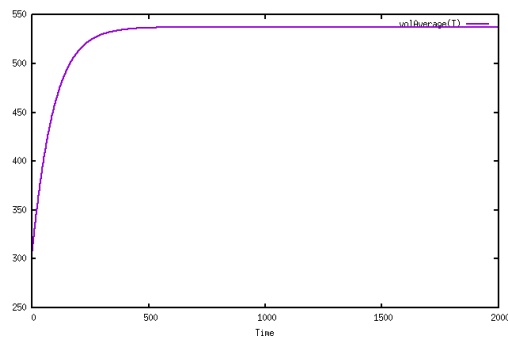


Рис. 19: Зависимость средней температуры нагревателя от шага

Далее были построены графики распределений температуры в центральном сечении:

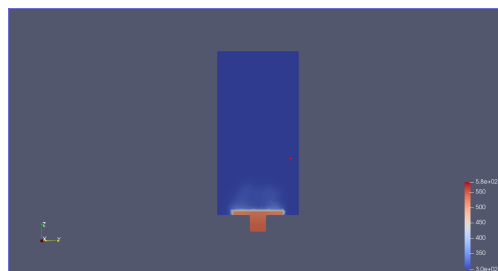


Рис. 20: Распределение температуры для модели 1

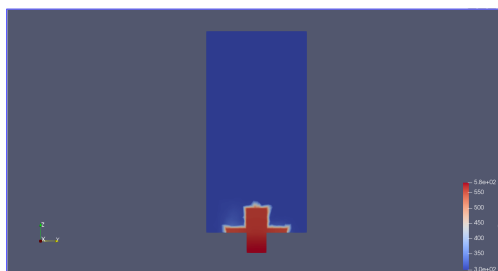


Рис. 21: Распределение температуры для модели 2

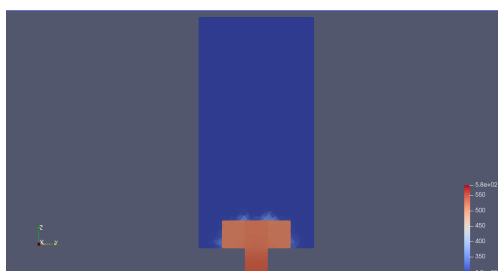


Рис. 22: Распределение температуры для модели 3

И графики распределений скоростей:

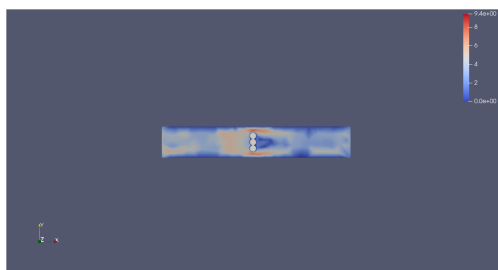


Рис. 23: Распределение скоростей для модели 1

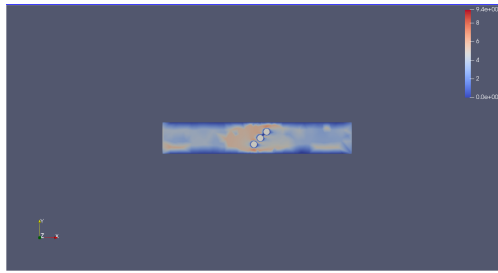


Рис. 24: Распределение скоростей для модели 2

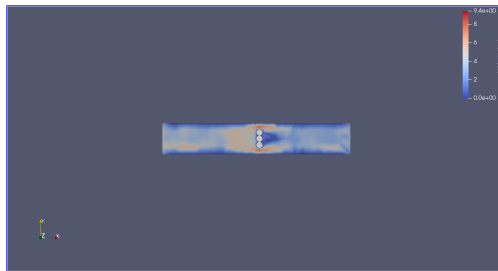


Рис. 25: Распределение скоростей для модели 3

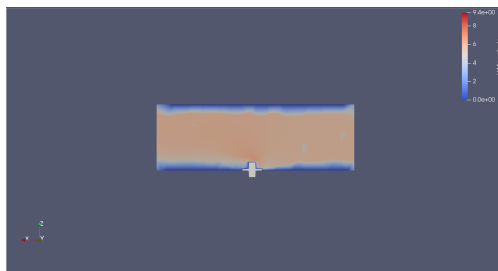


Рис. 26: Распределение скоростей для модели 1

### 3 Заключение

Результаты анализа указывают на следующие выводы: вторая модель имеет наивысшую среднюю температуру радиатора, нагревателя и интерфейса между ними, что может указывать на менее эффективное охлаждение. Первая и третья модели демонстрируют более низкие значения средних температур радиатора, нагревателя и интерфейса. Таким образом, основываясь на полученных результатах, можно сделать вывод о наибольшей эффективности охлаждения и лучшей теплоотдаче в первой модели, где наблюдается наименьшая средняя температура нагревателя, указывающая на более эффективную передачу тепла. Результаты исследования подтверждают, что форма радиатора влияет на его эффективность и теплоотдачу. Модель 1 с определенным распределением цилиндров обеспечивает наилучшие результаты в задаче охлаждения нагретого тела. Данный результат связан с тем, что форма и расположение цилиндров в модели 1 позволяют более равномерно распределить тепловую нагрузку и обеспечить эффективное охлаждение, поскольку цилиндры имеют прямой контакт между собой. Во второй модели, где отсутствует касание между цилиндрами, наблюдается наихудший результат среди рассмотренных моделей.



## 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. 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 Приложение А

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

## 5 Приложение Б

В процессе работы был найден баг в SALOME-9.9.0: при дампе Python скрипта с сеткой создается файл с ошибкой.

```
try:
    Mesh_1.ExportUNV(r'C:/File', 0)
    pass
except:
    print('ExportUNV() failed. Invalid file name?')
```

Рис. 27: Ошибка экспорта сетки

Для её решения достаточно удалить лишние символы:

```
try:
    Mesh_1.ExportUNV(r'C:/File')
    pass
except:
    print('ExportUNV() failed. Invalid file name?')
```

Рис. 28: Решение ошибки экспорта сетки