

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиотехники и электродинамики
наименование кафедры

**Моделирование тепловых процессов в электронных приборах с помощью
программного комплекса OPENFOAM**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента **4** курса **4032** группы

направления 03.03.03 «Радиофизика»

код и наименование направления

института физики

наименование института

Ламцова Виктора Михайловича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. ст., уч. зв.

личная подпись, дата

И.А. Ермолаев

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

уч. ст., уч. зв.

личная подпись, дата

О.Е. Глухова

инициалы, фамилия

Саратов 2022 г.

Значительное количество разрабатываемых в настоящее время устройств электроники, как полупроводниковой, так и СВЧ, увеличивает необходимость моделирования в этой сфере. В том числе и тепловых процессов, сопровождающих функционирование электронных приборов и компонент и часто являющихся критичными.

Моделирование в этой области крайне важно, так как это позволяет оптимизировать работу, долговечность, стоимость разрабатываемых устройств или уже созданных. Моделирование теплообмена, например, в плоском радиаторе для полупроводников позволяет рассчитать оптимальные параметры для этого устройства, без затрат на производство тестовых образцов и использования дорогостоящих и сложных приборов для исследования. В мире радиотехники, и современных технологий это очень важный этап разработки. Подобные методы моделирования физических процессов используются практически во всех отраслях технологичного производства, именно благодаря чему и удалось оптимизировать процесс создания новых технологий и электронных устройств.

Одним из подобных инструментов численного моделирования является программный комплекс OpenFOAM. С его помощью можно моделировать аэродинамику различных тел, тепловые процессы в системах охлаждения электронных компонентов и др.

OpenFOAM позволяет моделировать также электростатические и магнитные поля, что важно для исследований и разработки радиотехнических схем, особенно, в которых есть дроссели, трансформаторы, катушки и чувствительные к электрическим полям микросхемы.

В том числе и теплораспределение, расчёт которого крайне важен при проектировании любых вычислительных и не только электронных систем. Но OpenFOAM производит лишь численные вычисления. Необходима визуализация и 3D моделирование, что позволяет сделать такие программы, как например ParaView, которая также является модулем для визуализации платформы SALOME.

Таким образом, в работе рассматривается открытый инструментарий OpenFOAM, платформа для численного моделирования SALOME, инструмент для визуализации ParaView. Данный набор программных инструментов применен для численного моделирования тепловых процессов, происходящих в системе охлаждения полупроводникового устройства.

OpenFOAM - Open Source Field Operation And Manipulation CFD ToolBox, или если по русски, то это интегрируемая платформа с открытым исходным кодом для численного моделирования задач механики сплошных сред.

OpenFOAM является свободно распространяемым инструментарием вычислительной гидродинамики для операций с полями, в частности, скалярными, векторными и тензорными. На сегодняшний день он является одним из полностью завершённых в плане разработки и одним из самых

популярных программных инструментариев в мире, предназначенных для метода конечных объёмов.

В основе кода лежит набор библиотек, предоставляющих инструменты для решения систем дифференциальных уравнений в частных производных как в пространстве, так и во времени.

SALOME — открытая интегрируемая платформа для численного моделирования. Представляет собой набор пре- и постпроцессинга.

Данная платформа создана для численного моделирования, в интернете очень мало данных про её использование, а доступ к некоторым зарубежным сайтам из Российской Федерации теперь, к сожалению, недоступен, но при этом всё равно есть возможность скачать её с официального сайта, она довольно полезна при сложных проектах и используется в связке с OpenFOAM в качестве «Мешера», то есть с её помощью можно обрабатывать САПР и создавать «сетку».

Программное обеспечение для визуализации и анализа данных с открытым исходным кодом для Linux, Windows и MacOS. С помощью этого приложения можно создавать визуализации для анализа данных с использованием качественных и количественных методов. Он также поддерживает трёхмерное или программное исследование данных. Использование этой программы варьируется от тепловых исследований, моделирования CFD и других методов с применением инструментариев по физическому и математическому моделированию.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЛОСКОМ РАДИАТОРЕ. Трёхмерная задача

В электротехнике существует множество типов задач, которые позволяет решать OpenFOAM, одна из самых распространённых и простых это задача теплораспределения по радиатору охлаждения, которые используются для многих процессоров, транзисторов и других элементов радиотехники, которым свойственно нагреваться, а ведь перегрев элемента в таких случаях может привести к снижению работоспособности, проводимости и способен полностью вывести из строя устройство.

В работе использовался классический радиатор с плоским основанием и теплопроводящими рёбрами, которые можно увидеть на большинстве радиаторов для охлаждения процессоров и транзисторов. Так же моделировался поток воздуха определённой температуры.

Основные параметры численного опыта №1:

- Максимальная температура нагрева чипа равна 330 К, то есть это температура чипа, до которой он может нагреться без охлаждения.
- Скорость воздушного потока 2 м/с.
- Температура воздушного потока 300 К (что соизмеримо с комнатной температурой)

Хотелось бы отметить, что в роли источника тепла выступает кремниевый чип (микросхема).

Время расчета зависит от объёма данных, масштаба сетки и конечного времени задачи. В данном случае понадобилось 34244 секунды для полного решения, это практически 10 часов, всё это время происходит постоянная обработка данных, прерывать её нельзя и естественно, компьютер должен быть всё это время включён.

Завершение вычислений показано на Рис. 5.1

```

Solving for solid region heat_sink_solid
GAMG: Solving for h, Initial residual = 0.000727446, Final residual = 1.13577e-11, No Iterations 1
Min/max T:318.152 320.853
ExecutionTime = 33908.4 s ClockTime = 34237 s

Region: air_fluid Courant Number mean: 3.8219 max: 9.99201
Region: chip_solid Diffusion Number mean: 0.553759 max: 2.57903
Region: heat_sink_solid Diffusion Number mean: 0.537677 max: 3.20403
deltaT = 0.0174622
Time = 299.983

Solving for fluid region air_fluid
diagonal: Solving for rho, Initial residual = 0, Final residual = 0, No Iterations 0
DILUPBiCGStab: Solving for Ux, Initial residual = 7.51226e-08, Final residual = 3.66519e-10, No Iterations 1
DILUPBiCGStab: Solving for Uy, Initial residual = 1.4468e-07, Final residual = 1.05955e-09, No Iterations 1
DILUPBiCGStab: Solving for Uz, Initial residual = 1.94685e-07, Final residual = 2.83291e-09, No Iterations 1
DILUPBiCGStab: Solving for h, Initial residual = 8.01141e-05, Final residual = 6.93538e-09, No Iterations 1
Min/max T:300 321.097
GAMG: Solving for p_rgh, Initial residual = 6.12973e-08, Final residual = 5.64746e-09, No Iterations 1
diagonal: Solving for rho, Initial residual = 0, Final residual = 0, No Iterations 0
time step continuity errors : sum local = 4.77354e-11, global = -2.81077e-12, cumulative = -2.81077e-12
Min/max rho:1.225 1.225
DILUPBiCGStab: Solving for epsilon, Initial residual = 5.87444e-07, Final residual = 1.32894e-09, No Iterations 1
DILUPBiCGStab: Solving for k, Initial residual = 7.49424e-10, Final residual = 7.49424e-10, No Iterations 0

Solving for solid region chip_solid
GAMG: Solving for h, Initial residual = 0.00566668, Final residual = 7.14222e-11, No Iterations 1
Min/max T:320.535 321.1

Solving for solid region heat_sink_solid
GAMG: Solving for h, Initial residual = 0.000727432, Final residual = 1.13575e-11, No Iterations 1
Min/max T:318.153 320.854
ExecutionTime = 33910.2 s ClockTime = 34238 s

Region: air_fluid Courant Number mean: 3.8219 max: 9.99201
Region: chip_solid Diffusion Number mean: 0.553759 max: 2.57903
Region: heat_sink_solid Diffusion Number mean: 0.537677 max: 3.20403
deltaT = 0.0174622
Time = 300

Solving for fluid region air_fluid
diagonal: Solving for rho, Initial residual = 0, Final residual = 0, No Iterations 0
DILUPBiCGStab: Solving for Ux, Initial residual = 7.5245e-08, Final residual = 3.6688e-10, No Iterations 1
DILUPBiCGStab: Solving for Uy, Initial residual = 1.44606e-07, Final residual = 1.05924e-09, No Iterations 1
DILUPBiCGStab: Solving for Uz, Initial residual = 1.9462e-07, Final residual = 2.83168e-09, No Iterations 1
DILUPBiCGStab: Solving for h, Initial residual = 8.01116e-05, Final residual = 6.93518e-09, No Iterations 1
Min/max T:300 321.098
GAMG: Solving for p_rgh, Initial residual = 6.19005e-08, Final residual = 5.61328e-09, No Iterations 1
diagonal: Solving for rho, Initial residual = 0, Final residual = 0, No Iterations 0
time step continuity errors : sum local = 4.74464e-11, global = 2.33747e-12, cumulative = 2.33747e-12
Min/max rho:1.225 1.225
DILUPBiCGStab: Solving for epsilon, Initial residual = 5.87238e-07, Final residual = 1.32848e-09, No Iterations 1
DILUPBiCGStab: Solving for k, Initial residual = 7.49424e-10, Final residual = 7.49424e-10, No Iterations 0

Solving for solid region chip_solid
GAMG: Solving for h, Initial residual = 0.00566655, Final residual = 7.14353e-11, No Iterations 1
Min/max T:320.536 321.101

Solving for solid region heat_sink_solid
GAMG: Solving for h, Initial residual = 0.000727418, Final residual = 1.1358e-11, No Iterations 1
Min/max T:318.154 320.855
ExecutionTime = 33914.4 s ClockTime = 34244 s

End

```

Рис. 5.1 - Окончание процесса вычислений в терминале

Был выбран радиус 0,05 и установлен в положение параллельно граням радиатора, для наилучшего обтекания и захвата наибольшего количества тепла.

Положение области источника и воздушного потока можно увидеть на Рис. 5.2

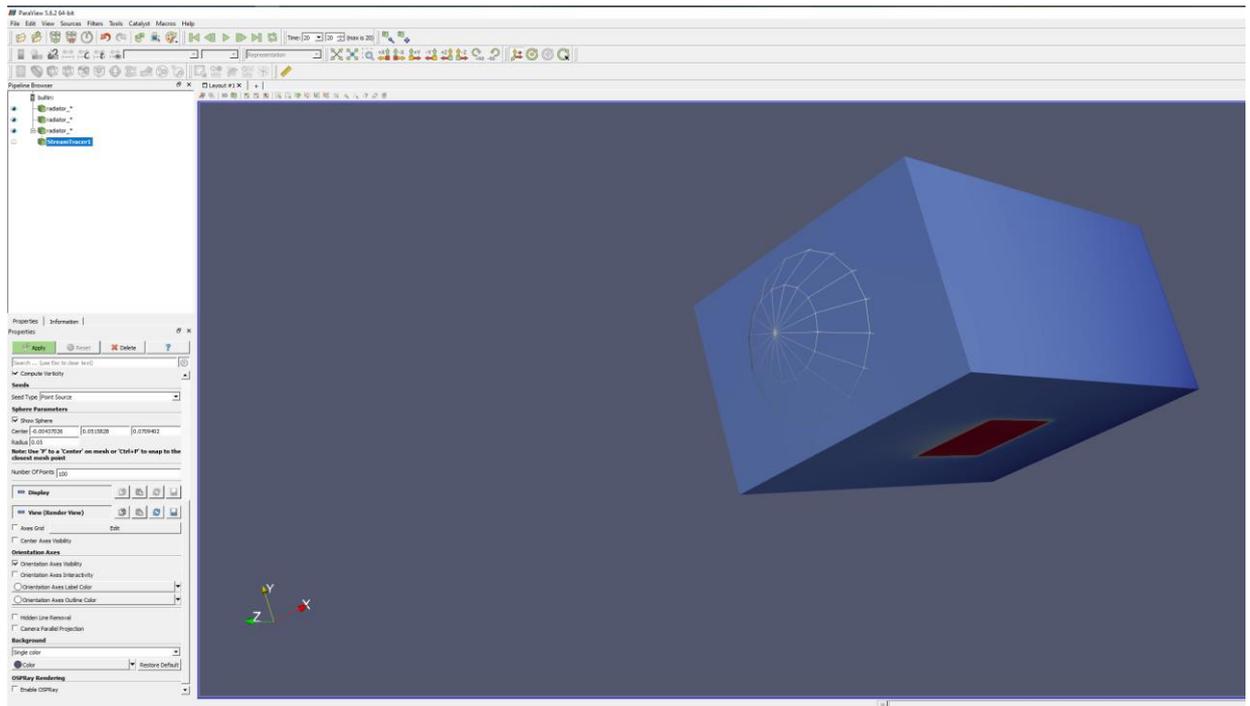


Рис. 5.2 – Область источника тепла и воздушного потока

После добавления области воздушного потока, необходимо нажать «Apply», таким образом применятся новые параметры и сам воздушный поток появится в визуализации, после этого нужно нажать кнопку проигрывания и запустить визуализацию охлаждения, она автоматически закончится на последнем кадре и можно будет увидеть итог всего процесса охлаждения и тепло распределения «Рисунок 5.3».

А для того, чтобы увидеть только радиатор и воздушный поток, необходимо убрать из поля видимости область применения воздушного потока, т.е. область, в которой прописан воздушный поток, а именно файл «air_fluid», после чего можно будет наблюдать только за радиатором охлаждения и чипом (зоной нагрева).

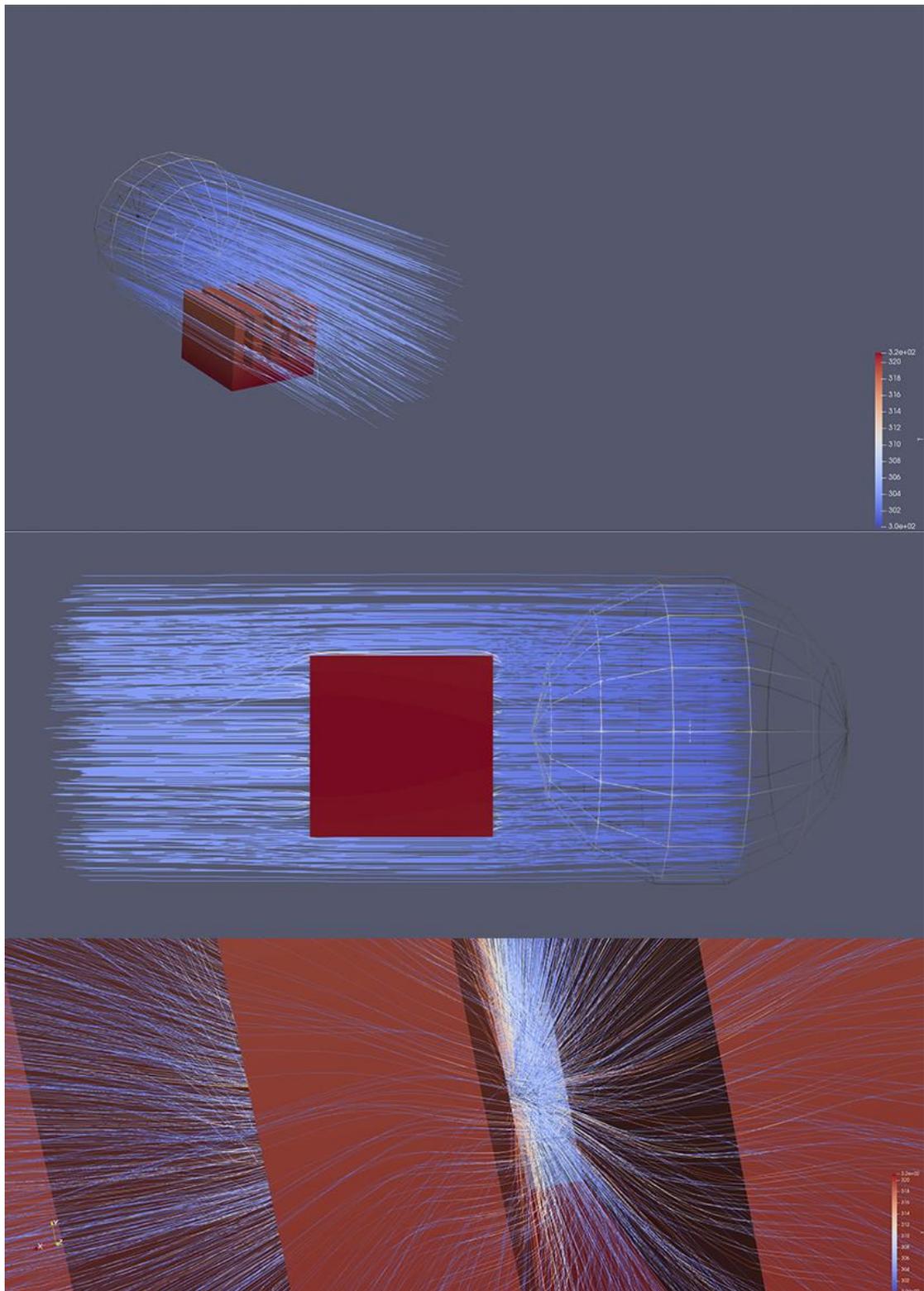


Рис. 5.3 - Теплоперенос и охлаждение (ParaView)

Как можно отметить, самая нагретая область – это зона чипа, она нагрелась до температуры в 321 К, что равняется 47,85 градусам по Цельсию, это допустимая температура для большинства чипов и микросхем, а также процессоров.

Радиатор нагревается до 318-320 К (44-46,85 градусов по Цельсию), а без воздушного охлаждения его температура была бы равна 325-330 К, а так как не

т

было бы оттока тепла, то в реальных условиях чип бы вскоре перегрелся и произошло бы нарушение его работы или полный отказ.

Во втором численном эксперименте изменяется скорость воздушного потока от 2 до 4 м/с, а также плотность и размер источника в два раза.

Основные параметры опыта №2:

- Максимальная температура нагрева чипа будет равна 330 К.
- Скорость воздушного потока 4 м/с.
- Температура воздушного потока 300 К

Если интенсивность и размер воздушного потока можно изменить напрямую в ParaView, то после внесения изменений в исходные файлы с данными нужно снова запускать процесс вычислений, который занимает много времени, для его ускорения можно добавить файл по параллельному вычислению данных и тогда процесс значительно ускорится, подобный файл можно скопировать из встроенного учебника «interFoam/damBreak/damBreak» OpenFoam и задать там необходимое количество параллельных участков вычисления, которые зависят от количества ядер процессора.

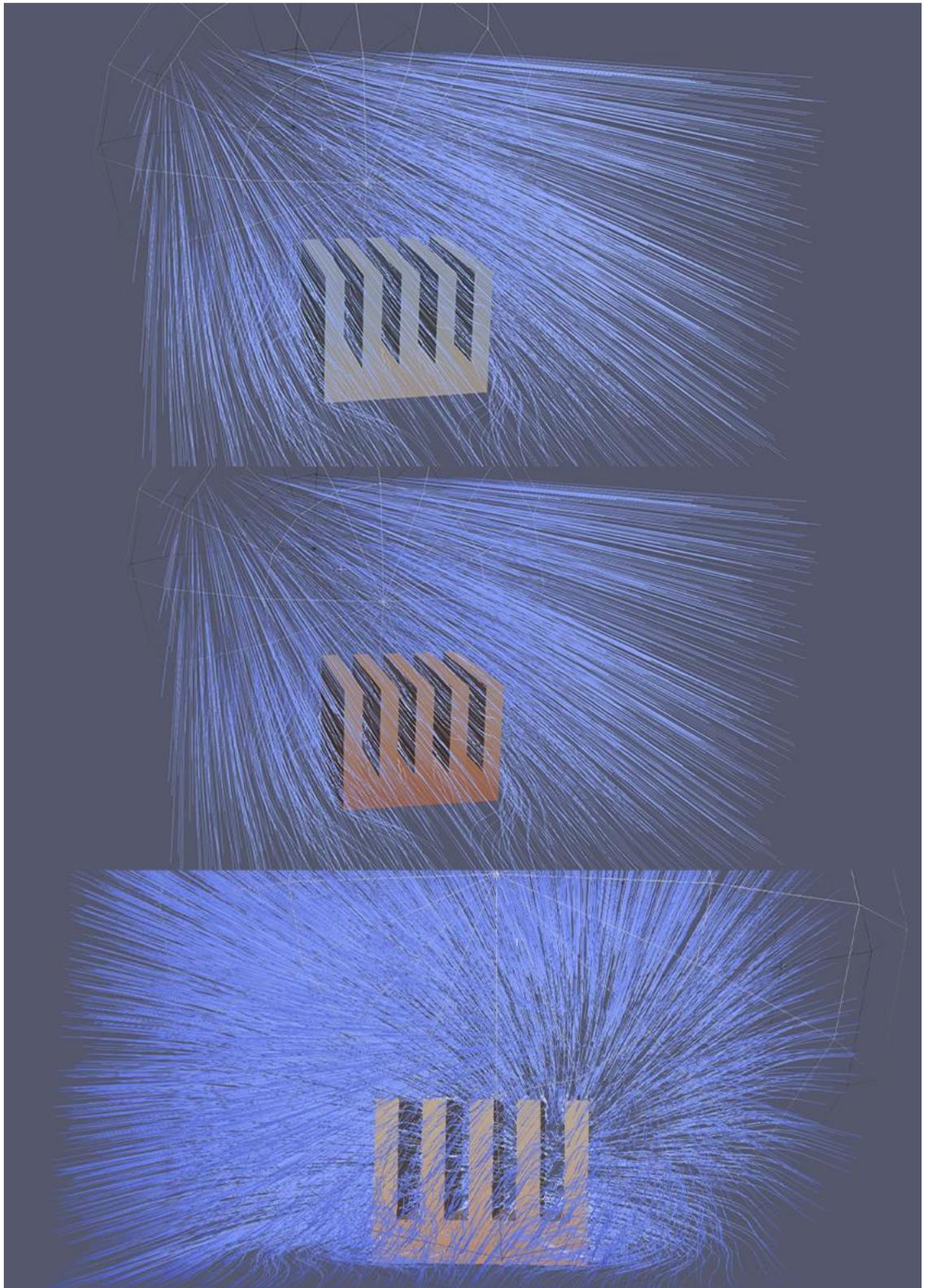


Рис. 5.4 - Вид радиатора и воздушного потока в опыте №2

Сравним данные, полученные в опыте №1 и опыте №2, с помощью графика, на котором отображено изменение температуры во времени (Рис. 5.5)

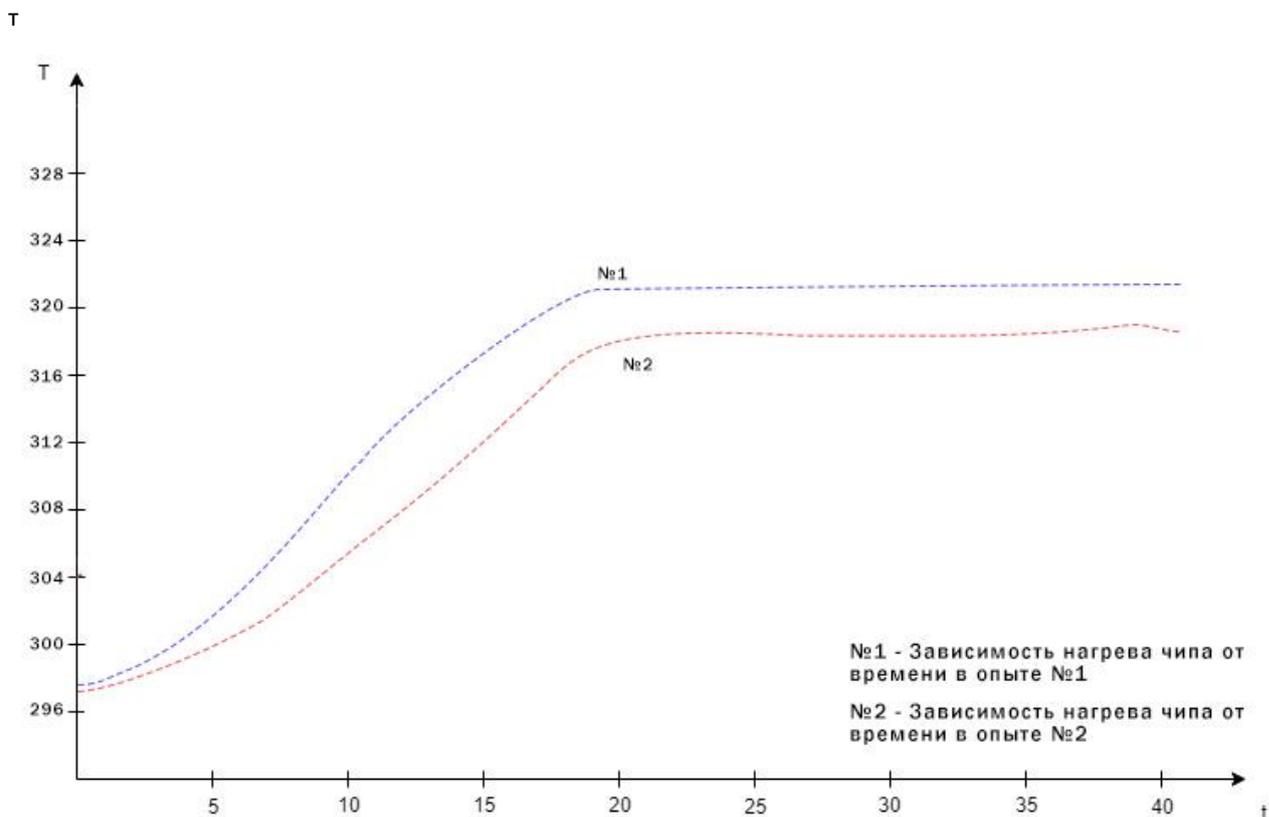


Рис. 5.5 – Зависимость максимальной температуры от времени охлаждения чипа

Вследствие увеличения скорости потока удалось температура снижается от 321 К в опыте №1, до 318 К в опыте №2.

Таким образом, программный комплекс OpenFOAM был использован для решения задачи охлаждения и термостабилизации полупроводниковых компонент. Выявлены временные зависимости температурного поля чипа при различных параметрах охлаждения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Источник сборки blueCFD OpenFOAM, где его можно скачать: <http://bluecfd.github.io/Core/Downloads/#bluecfd-core-2016-1>
2. Википедия: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.ac600c03-626add38-02d3793a74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Paraview
3. <https://ru.wikipedia.org/wiki/SALOME>
4. https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_volume_method
5. Официальный сайт разработчиков OpenFOAM: <https://www.openfoam.com>
6. Видео инструкция по установке OpenFOAM на Windows через ubuntu: https://www.youtube.com/watch?v=cUbC0MrkiOA&ab_channel=J%C3%B3zsefNagy

7. Уроки по OpenFOAM на испанском языке:
https://www.youtube.com/watch?v=9DIAQEOQ_5w&ab_channel=NSIVIO
8. Источник Рисунка 2.1 ANSYS Fluent, а именно его интерфейс:
https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=aojSkLay4jU&ab_channel=ANSYS_CFDtutorialsandcourses
9. Всё об OpenFoam: https://wiki.openfoam.com/Main_Page
10. С. Патанкар Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984 197 с.
11. Чиннов Е.А., Кабов О.А. Двухфазные течения в трубах и капиллярных каналах //Теплофизика высоких температур, 2006, том 44, №5, с. 777-795
12. Основы OpenFOAM: <https://habr.com/ru/post/215391/>
13. Физическая энциклопедия / гл.ред. Прохоров А.М. - М.: Большая российская энциклопедия. 1994.
14. «Эффективные способы охлаждения силовых полупроводниковых приборов» Исакеев А.И.