

МРНТИ 27.35.21

Ф.Ф. Богоутдинов¹ (Orcid - 0000-0002-4687-9044) – основной автор,
А.А. Исахов² (Orcid - 0000-0002-7539-6826)

¹Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан

²Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан
e-mail:¹f_musabai@mail.ru, ²alibek.issakhov@gmail.com

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ

Аннотация. В данной статье изучается процесс конвективного теплообмена от чипов в вертикальном электронном устройстве с различными скоростями потока воздуха. В качестве решения была взята математическая модель движения воздушного потока и конвективного теплопереноса в виде уравнений Навье-Стокса и численный алгоритм расчета уравнений в программе. Были проведены два тестовых задания с расчетом температуры и скорости движения ламинарного потока в вертикальном канале с углублением. Более того произведен анализ результатов расчетов в этих условиях и сравнение их с результатами исследования конкретной статьи в виде графика двух работ. Основная задача заключается в исследовании построенной модели вынужденно-конвективного теплообмена в электронном устройстве, содержащем электронные микросхемы, нагретые до определенной температуры, а также в сравнении удельных скоростей потока и их влиянии на изменения температуры по всему устройству. При расчете были получены результаты, по которым построены графики, контуры температуры. Результаты показали, что более высокая скорость потока воздуха системы охлаждения уменьшает температуру внутри устройства и самих чипов.

Ключевые слова: охлаждение, температура, скорость воздушного потока, кулеры, чипы в устройстве.

Введение. В данной работе рассматривалась активная система охлаждения, для увеличения скорости проходящего потока ставились специальные вентиляторы, называемые кулерами. Все компоненты компьютера работают непосредственно за счет электрического тока, следовательно, все они могут нагреваться при увеличении уровня нагрузки на них. Проблема нагрева элементов приводит к снижению производительности компьютера или даже к прекращению его работоспособности, поэтому данная система необходима для устранения таких проблем, в том числе выветривания пыли.

Принцип воздушного охлаждения – тепло, выделяемое какой-либо деталью или элементом компьютера за счет воздушного потока, перенаправляется на радиатор, а затем выходит наружу [1].

Основным условием эффективности активного охлаждения является скорость потока. Есть вентиляторы без регулировки скорости, потому что они имеют постоянные обороты. Однако есть вентиляторы с автоматическим ШИМ-управлением (широотно-импульсная модуляция). Он автоматически настроен на управление вращением оборотов в зависимости от температуры, чтобы уменьшить потребление оборотов и уменьшить громкость шума. Средняя скорость воздушного потока, создаваемого охладителем, составляет 0.5-2.0 м/с. Эта величина зависит от выделяемого тепла чипов, т.е. с увеличением тепла увеличивается и скорость воздуха для

предотвращения сгорания чипов и т. д. Были выполнены три численных расчета при потоках 0.5, 1.0 и 2.0 м/с.

Преимущества этой системы:

1. Низкая стоимость вентиляторной системы по сравнению с другими видами охлаждения, например, жидкостным охлаждением.
2. Упрощенная установка, так как достаточно просто прикрепить вентилятор в нужное место.
3. Кроме того, простота обслуживания и возможность модификации.

Недостатками этой системы являются:

1. Низкая производительность для мощных процессоров.
2. Большой шум от вентиляторов и размеры вентиляторов и радиаторов.
3. Появление пыли, при использовании вентиляторов необходимо чаще очищать системный блок от скопившейся внутри пыли, так как она увеличивает, нагрев элементов и снижает эффективность прохождения потока.

Движение жидкости или газа, вызванное действием внешних сил и однородных полей внутренних массовых сил, называется вынужденной конвекцией [2]. В данной модели исследования рассматривается вынужденная конвекция, так как в качестве внешней силы принят охладитель, создающий ламинарный поток воздуха, тем самым способствуя охлаждению нагретых элементов.

Охлаждение электронных устройств — это общая тема у исследователей, поэтому многие ученые изучают и моделируют его. Например, Y. Amirouche и R. Bessaih [3] изучали охлаждение естественной конвекцией пяти чипов в вертикальной конструкции в виде канала и обнаружили, что каждый элемент имеет одинаковое равномерное температурное поле, и показали, что охлаждение лучше, когда число Рэлея больше или, когда теплопроводность и длина между вертикальными стенками меньше. Лин, Армали и Чен [4] показали, как силы плавучести влияют на ламинарный теплообмен внутри вертикального блока с шагом назад. Аналогичная задача, но с измененным условием в ней ставилась ступенька с ходом вперед, изученная Ясутакой Нагано и Хирофуми Хаттори [5]. Ханов, Белкина [6] показали перспективность снижения энергопотребления системы охлаждения с использованием двигателя Стирлинга.

В работе Кандырина и Хватынец «Выбор устройств охлаждения процессоров в электронной технике» описывает элементы Пельтье [7]. Более того, Гнусин [8] изучал работу элемента Пельтье в трех различных режимах: без отвода тепла, пассивный режим охлаждения, активный режим. Он показал, что с увеличением напряжения на элементе относительная эффективность охлаждения снижается. Также эффективность этого охлаждения значительно повышается при наличии пассивной вытяжки и особенно при появлении вентилятора, то есть в активном режиме.

В статье RuiWang, JiyuQian, TaoWei, HaojieHuang [9] предлагается внутренняя замкнутая охладительная система для мощных микросхем и для решения проблем с низкой емкостью примесей и низкой надежности других систем при охлаждении мощных микросхем. HamdyHassan, AbdelShafey провели исследование естественной конвекционно-радиационной теплопередачи чипа, охлаждаемого с помощью прямоугольного радиатора. В данной работе модель решена численно через метод конечных разностей.

Более того, как влияют стороны корпуса и мощность чипа на охлаждение, теплопередачу [10]. Работа Mezghaba, Bouali, Amaoui, Bouzidib [11] содержит численное исследование взаимодействия естественной конвекции и излучения в дифференциально-обогреваемой полости с внутренним квадратным телом. Для решения было использована модель с методом конечных объемов и алгоритм SIMPLER для связи давление-скорость. Хамди Хассан и Суад Харманд [12] предлагают 3D гидродинамическую и тепловую модель с плоской тепловой трубой для охлаждения внутренних электронных компонентов. Для решения использовали неявный метод конечных разностей. Они также исследовали влияние подводимой мощности, коэффициента теплоотдачи охлаждающей жидкости на производительность испарительной камеры и что при увеличении этих параметров максимальная разница давлений между трубой и конвекцией внутри областей фитиля увеличивается.

В данной статье рассмотрено математическое моделирование теплопередачи воздуха от кулера по всему электронному устройству, обтекающего все присоединенные к нему микросхемы, а также влияние скорости потока на изменение и распределение температуры воздуха. Объект электронного устройства представляет собой вертикальный канал с девятью кубическими чипами с выделением от них определенного количества тепла. Поэтому в качестве охлаждения с учетом силы тяжести использовался охладитель с различными скоростями, направленными по каналу снизу вверх. Для сравнения также было выполнено тестовое задание в вертикальном канале с резким протяженным углублением.

Математическая модель. Математическая модель конвективного теплообмена имеет вид [13]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \beta g (T - T_0) \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

где: u, v, w - элементы вектора скорости, x, y, z - Декартовы координаты точки, T - температура, t - время, P - давление, ρ, ρ_0 - плотность и начальная плотность, ν - кинематическая вязкость, g - ускорение свободного падения, α, β, ν - температурный коэффициент диффузии, кинематическая вязкость, коэффициент теплового расширения соответственно [14].

Численный алгоритм. Для решения задачи был взят известный, распространенный численный алгоритм SIMPLE для уравнений Навье-Стокса [15]. Этот нестационарный алгоритм делится на следующие действия:

1. Определение начального поля давления p^0 и пункты назначений $p^* = p^0, t = 0$.
2. Вычисление начальных скоростей u^0, v^0, w^0 .
3. Расчет u^*, v^*, w^* решая уравнения движения.
4. Решение уравнений p' и нахождение p добавив p' к p^* .
5. Вычисление u, v, w из u^*, v^*, w^* через формулы коррекции скорости.
6. Если $|p'|$ маленькая во всех узлах сетки расчета, то $p^0 = p, u^0 = u, v^0 = v, w^0 = w, t = t + \Delta t$. Иначе найти $p = p^*$ и перейти на шаг 3.
7. Если $t < T_{max}$, то перейти на шаг 3.

Тестовая задача. В качестве тестовой задачи была взята статья Лина, Армали и Чена [4]. Геометрия задачи представляет собой вертикальный канал с углублением, в котором течет ламинарный двумерный поток, поддерживающий плавучесть, как показано на рисунке 1.

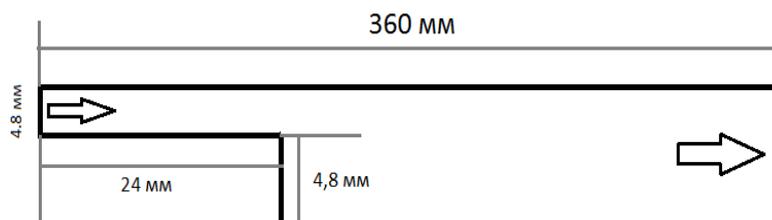


Рис. 1. Геометрия тестовой задачи

Входной поток поступает в канал меньшей ширины, равной 4.8 мм, с температурой, равной $T_0 = 20^\circ\text{C}$ и 24 мм длины. Кроме того, в канале есть отступ, равный ширине меньшего канала, поэтому поток продолжает движение и выходит из большего канала с высотой, вдвое превышающей входной канал. Кроме того, нижняя стенка выпускного канала нагревается до температуры T_w . Общая длина всего канала 360 мм. Поток входит в канал с определенной скоростью U_0 в котором остальные стенки адиабатические, также учитывается сила тяжести. Результаты расчета сравнивались с результатами статьи по профилю канала, а именно $X=1.0$ при разнице температур $\Delta T = T_w - T_0$ которые равны 1°C , 50°C .

Граничные условия:

1. Левый край или вход канала: $u = U_0, v = 0, T = 20^\circ\text{C}$

2. Правый край или выход канала: $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0, \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0, \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = 0$

3. Нижнее адиабатическое ребро: $u = 0, v = 0, T = T_w^\circ\text{C}$

4. Верхнее ребро: $u = 0, v = 0, T = 0$

5. Верхний край ступени: $u = 0, v = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0$

6. Нижний край ступени: $u = 0, v = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0$

На рисунках 2-3 видно, что расчетные профили температуры и результаты измерений в статье практически совпадают.

Все полученные результаты показывают, что расчет модели при определенных условиях был выполнен хорошо, так как видно, что результаты согласуются с расчетами, измеренными Линем, Армали, Ченом [4]. Отсюда можно сделать вывод, что модели похожи и описывают одинаковое поведение потока, особенно при $\Delta T = 1^\circ\text{C}$.

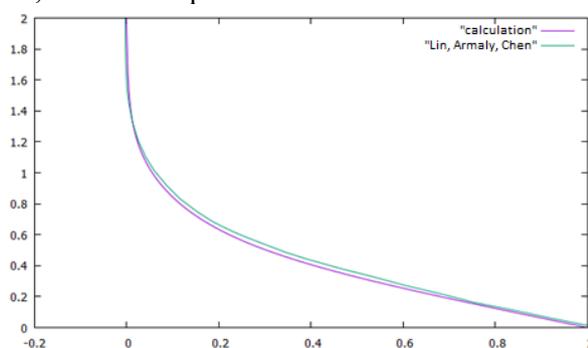


Рис. 2. Графики сравнения профилей температуры расчетов и измерений [4], снятые по $x=1.0$ и с разницей температур $\Delta T = T_w - T_0$ равной 1°C

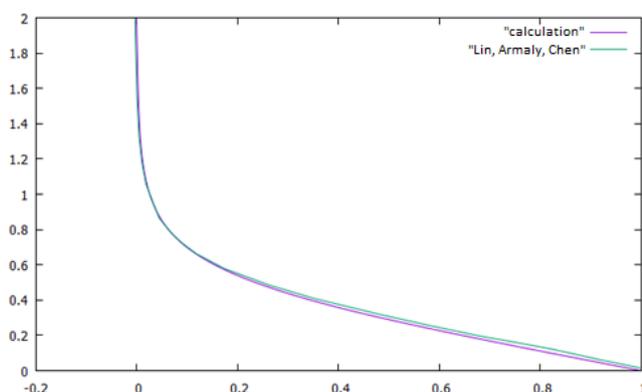


Рис. 3. Графики сравнения профилей температуры расчетов и измерений [4], снятые по $x=1.0$ и с разницей температур $\Delta T = T_w - T_0$ равной 50°C

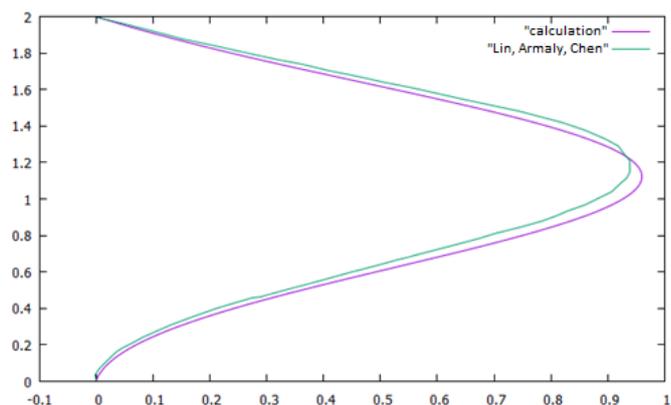


Рис. 4. Графики сравнения профилей скорости расчетов и измерений [4], снятые по $x=1.0$ и с разницей температур $\Delta T = T_w - T_0$ равной 1°C

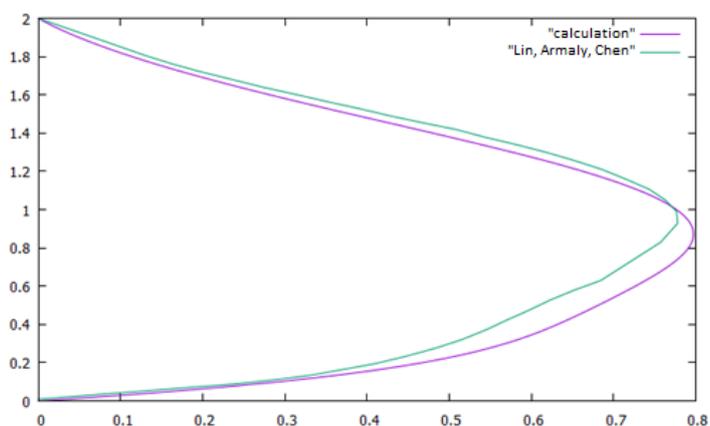


Рис. 5. Графики сравнения профилей температуры расчетов и измерений [4], снятые по $x=1.0$ и с разницей температур $\Delta T = T_w - T_0$ равной 50°C

Модель исследования. В качестве рассматриваемого объекта было взято вертикальное устройство с девятью прикрепленными кубическими чипами, выделяющими определенное количество тепла. Трехмерный ламинарный поток под действием силы тяжести движется в вертикальном электронном устройстве. Входной поток имеет температуру $T_0=18^\circ\text{C}$. В этом устройстве имеется 9 микросхем кубической формы размером $H=1.27$ см излучает тепло $T_{\text{max}}=70.5^\circ\text{C}$ во время работы. Длина входа и выхода 8.89 см. Стенки электроприбора имеют длину 26.35 см. Расстояние между фишками и длина между фишкой и стенкой равны $H=1.27$ см. При этом от проема до фишки и от фишки до выхода 10 см. Высота предмета 5.08 см. Наглядно геометрия продемонстрирована с разных сторон на рисунках 6 и 7.

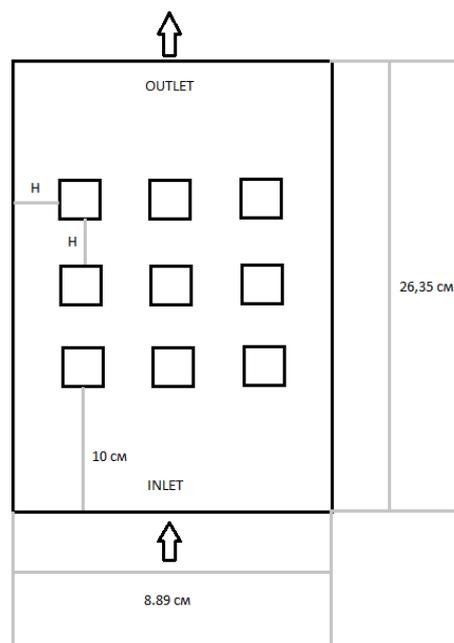


Рис. 6. Геометрия устройства и его данные из верхнего положения

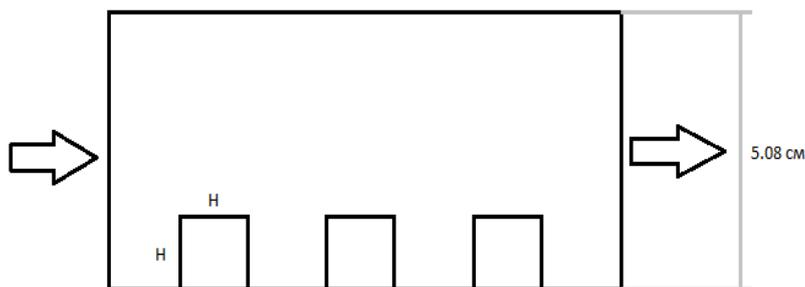


Рис. 7. Проекция геометрии из бокового положения

Вычислительная сетка строилась с общей характеристикой для всего объекта с размером элемента 1 мм и квадратным типом. Общее количество элементов 2091158. Граничные условия для всех граней устройства отмечены, потому что они имеют разные условия, поэтому нижние (входная) и верхние (выходная) грани задаются как «velocity_inlet» и «pressure_outlet» соответственно. Все остальные поверхности прямоугольного параллелепипеда обозначаются просто как стенки, а грани всех кубических фишек обозначаются отдельно как другие стенки, так как для них существует температурный режим.

Рассмотрены три потока с разными скоростями: 0.5, 1 и 2 м/с, для сравнения температуры в аппарате после вентиляции и изучения влияния скорости потока на температуру в разных частях объекта. Поэтому все это указывается в значениях скорости граничного входного потока. Далее модель рассчитывается на 3600 итераций для каждого эксперимента, а также строятся температурные контуры и графики значений скорости на конкретном участке.

На рисунках 8-10 ниже показаны профили температуры, полученные после расчета при различных расходах.

Сравнивая все вышеперечисленные схемы, можно сделать вывод, что с увеличением расхода температура в приборе снижается, появляются участки с длительным снижением температуры. Таким образом, передача тепла происходит быстрее с более высокой скоростью.

Для численного сравнения была проведена вертикальная линия вдоль устройства посередине проекта шириной 4.445 см и 0.31 см от верхних граней чипов в виде графика, как показано на рисунках 11 и 12.

На графике рисунка 13 линиями фиолетового, синего, зеленого цветов обозначена температура при скоростях 0.5, 1.0, 2.0 м/с. На этом графике показано снижение температуры вместе с устройством и максимальная температура после охлаждения.

Все результаты строились в программе Gnuplot и все графики отображались на одной плоскости. На графике видно, что температура падает за счет охлаждения. А скорость 2.0 м/с показывает лучший результат, при ней температура снижается больше. Поведение всех графиков похоже, отличаются только значения. Все сказанное позволяет сделать вывод, что чем выше скорость воздушного потока кулера, тем ниже температура чипа и всего устройства.

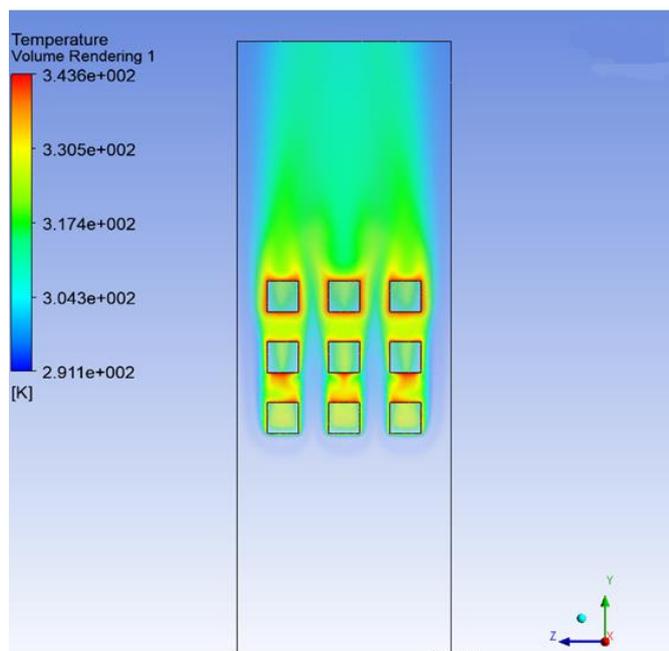


Рис. 8. Температурный контур сзади прибора при скорости 0.5 м/с

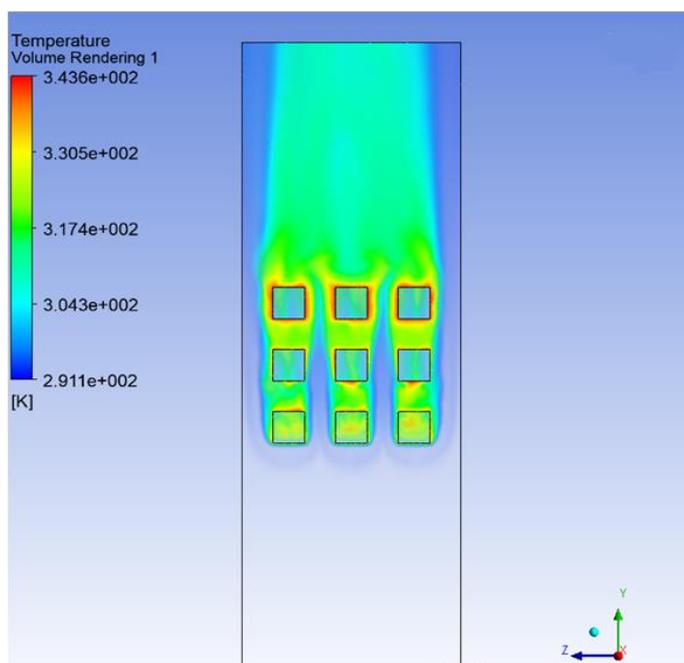


Рис. 9. Температурный контур сзади прибора при скорости 1 м/с

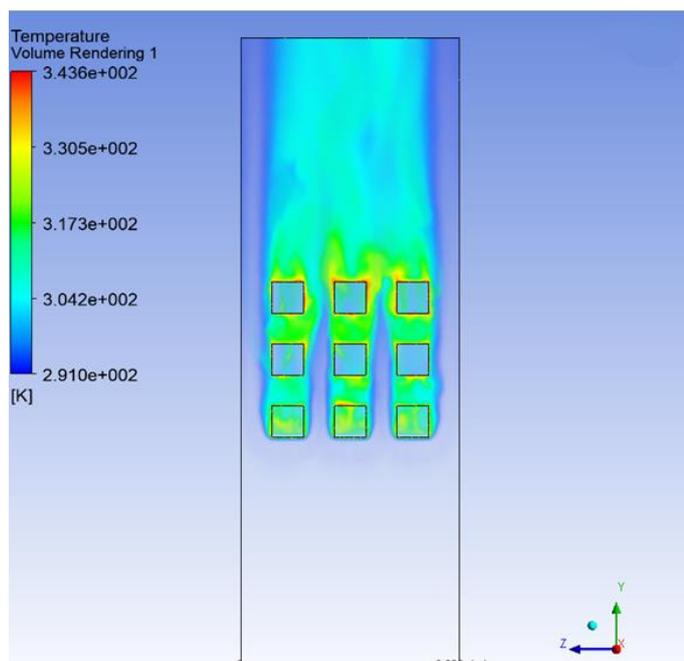


Рис. 10. Температурный профиль сзади устройства при скорости 2 м/с

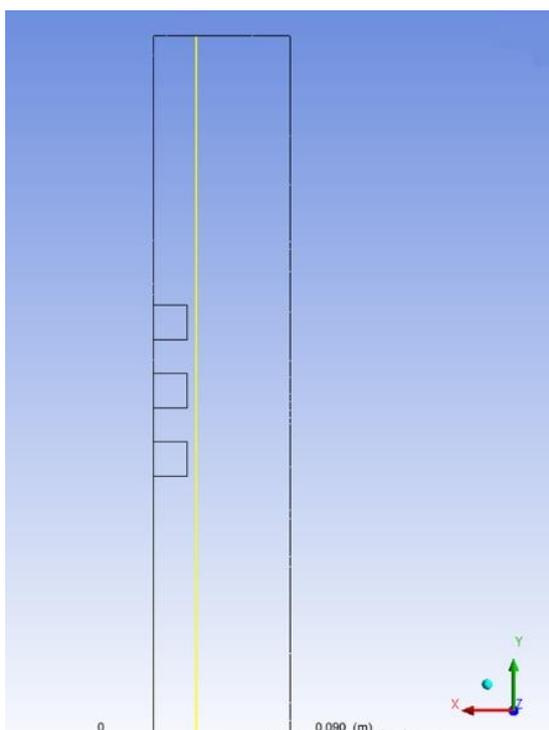


Рис. 11. Расположение линии сбоку

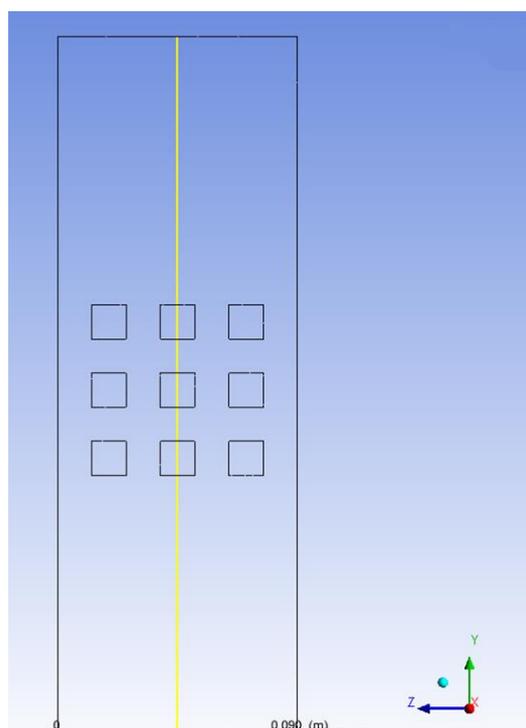


Рис. 12. Расположение линии сзади

Были сняты значения температуры 1000 точек вдоль этой линии при трех расходах и по этим значениям также построены графики с осями «Ох - длина прибора 26.35 см» и «Оу - температура».

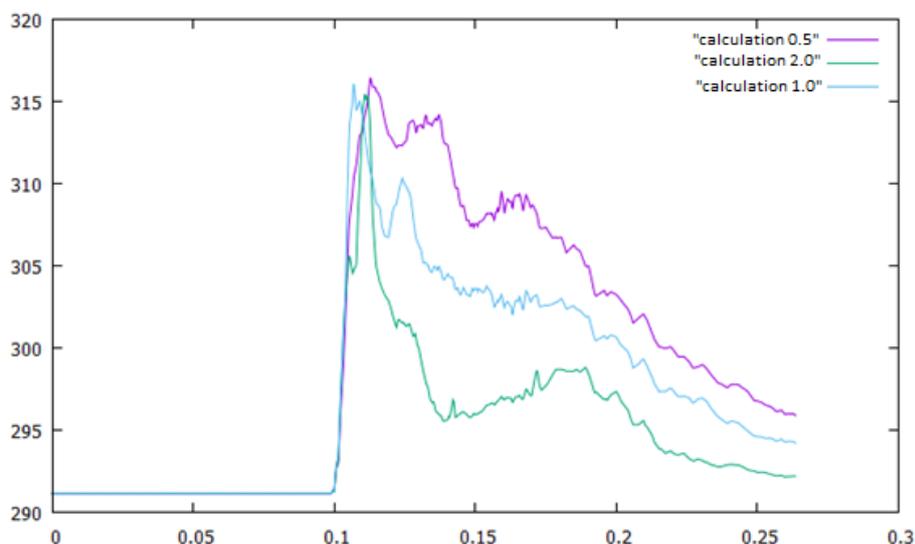


Рис. 13. График значений температуры по трассе при трех скоростях потока 0.5, 1.0, 2.0 м/с

Заключение. Построена геометрия задачи и рассчитаны значения температуры в приборе за определенное время при трех различных скоростях воздушного потока охладителя: 0.5, 1.0 и 2.0 м/с. По всем полученным результатам строились графики, которые сравнивались друг с другом. Графики показали, что скорость потока оказывает огромное влияние на изменения температуры. Для лучшего охлаждения необходимо увеличить скорость потока, то есть чем выше это значение, тем ниже температура в устройстве.

Помимо всего вышеперечисленного выполнялась одна тестовая задача: моделирование конвекции в вертикальном канале с реверсивной ступенью при различном нагреве нижней стенки, а именно 1°C и 50°C . Все полученные результаты демонстрируют сходство полученных графиков с оцифрованными графиками статьи [3] и описывают поведение равного потока, в основном при $\Delta T=1^{\circ}\text{C}$.

Список литературы

1. Разновидности воздушного охлаждения, а также их преимущества и недостатки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mcgrp.ru/article/4895-vozdushnyie-sistemyi-ohlajdeniya-pk#h1>.
2. Вынужденная конвекция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.heuristic.su/effects/catalog/est/byId/description/550/index.html>.
3. Amirouche Y. and Bessaih R. Three-Dimensional Numerical Simulation of Air Cooling of Electronic Components in a Vertical Channel. – 2012. – Vol. 8. – P. 295-309.
4. Lin J.T., Armaly B.F. and Chen T.S. Mixed convection in buoyancy-assisting, vertical backward-facing step flows. – 1990. – 33, No. 10, P. 2121-2132.
5. Yasutaka Nagano and Hirofumi Hattori. Investigation of turbulent boundary layer over forward-facing step by means of DNS. – Seoul, 2009. – P. 723-728.
6. Ханов, Г.В. Перспективный способ охладить электронные устройства [Текст] / Г.В. Ханов, Е.Б. Белкина // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия Прогрессивные технологии в машиностроении. – 2014. – №21 – С. 50-52.

7. Кандырин, Ю.В. Выбор устройств охлаждения процессоров в электронной аппаратуре [Текст] / Ю.В. Кандырин, С.А. Хватынец. – [?]. С. 5-6.
8. Гнусин, П.И. Исследование эффективности элемента Пельтье при различных режимах работы [Текст] / П.И. Гнусин // Видео наука. – СПб. - 2016. – №1(1). – С. 20-27.
9. Wang R., Qian J., Wei T. and Huang, H. (2021). Integrated closed cooling system for high-power chips. Case Studies in Thermal Engineering, 26, 100954.
10. Hassan H. and Shafey N.Y.A. (2021). 3D study of convection-radiation heat transfer of electronic chip inside enclosure cooled by heat sink. International Journal of Thermal Sciences, 159, 106585.
11. Mezrhab A., Bouali H., Amaoui H. and Bouzidi M. (2006). Computation of combined natural-convection and radiation heat-transfer in a cavity having a square body at its center. Applied Energy, 83(9), 1004–1023.
12. Hassan H. and Harmand S. (2013). A Three-Dimensional Study of Electronic Component Cooling Using a Flat Heat Pipe. Heat Transfer Engineering, 34(7), 596–607.
13. Исахов, А.А. Математическое и компьютерное моделирование физических процессов [Текст] / А.А. Исахов. – Алматы, 2018. – 280 с.
14. Ягов, В.В. Конвективный теплообмен [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://bigenc.ru/technology_and_technique/text/2088211.
15. Харламов, С.Н. Алгоритмы для моделирования гидродинамических процессов [Текст] / С.Н. Харламов. – Томск: ТПУ, 2008. – 36 с.

Материал поступил в редакцию 16.04.22.

Ф.Ф. Богоутдинов¹, А.А. Исахов²

¹Қазақ-Британ техникалық университеті, Алматы, Қазақстан

²әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан

ЭЛЕКТРОНДЫҚ ҚҰРЫЛҒЫЛАРДАҒЫ КОНВЕКТИВТІ ЖЫЛУ БЕРУДІ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Аннотация. Мақалада ауа ағынының әртүрлі жылдамдықтары бар тік электронды құрылғыдағы чиптерден конвективті жылу алмасу процесі қарастырылады. Шешім ретінде ауа ағынының қозғалысының математикалық моделі және Навье-Стокс теңдеулері түріндегі конвективті жылу-масса алмасу және бағдарламадағы теңдеулерді есептеудің сандық алгоритмі алынды. Тереңдетілген тік арнада ламинарлық ағынның жылдамдығы мен температурасын есептеумен екі тест тапсырмасы өткізілді. Сонымен қатар, осы жағдайларда есептеу нәтижелеріне талдау жасалды және оларды екі жұмыс кестесі түрінде нақты мақаланы зерттеу нәтижелерімен салыстырды. Негізгі міндет-белгілі бір температураға дейін қыздырылған электронды чиптері бар электронды құрылғыдағы мәжбүрлі конвективті жылу алмасудың құрастырылған моделін зерттеу, сонымен қатар ағынның нақты жылдамдығын және олардың бүкіл құрылғыдағы температураның өзгеруіне әсерін салыстыру. Есептеу кезінде нәтижелер алынды, олар бойынша графиктер, температура контурлары салынды. Нәтижелер салқындату жүйесінің жоғары ауа ағынының жылдамдығы құрылғы мен чиптердің ішіндегі температураны төмендететінін көрсетті.

Тірек сөздер: салқындату, температура, ауа ағынының жылдамдығы, салқындатқыштар, құрылғыдағы чиптер.

F.F. Bagautdinov¹, A.A. Isakhov²¹*Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan,*²*Kazakh National University named after al-Farabi, Almaty, Kazakhstan***MATHEMATICAL MODELING OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN ELECTRONIC DEVICES**

Abstract. This article studies the process of convective heat transfer from chips in a vertical electronic device with different air flow rates. As a solution, a mathematical model of the movement of the air flow and convective heat and mass transfer in the form of the Navier-Stokes equations was taken, as well as a numerical algorithm for calculating the equations in the program. Two test tasks were carried out with the calculation of the temperature and velocity of the laminar flow in a vertical channel with a recess. Moreover, the analysis of the results of calculations under these conditions and their comparison with the results of the study of a particular article in the form of a graph of two works was carried out. The main task is to study the constructed model of forced convective heat transfer in an electronic device containing electronic microcircuits heated to a certain temperature, as well as to compare specific flow rates and their effect on temperature changes throughout the device. When calculating, the results were obtained, according to which graphs, temperature contours were built. The results showed that the higher airflow rate of the cooling system reduces the temperature inside the device and the chips themselves.

Keywords: cooling, temperature, airflow rate, coolers, chips in the device.

References

1. Varieties of air cooling, as well as their advantages and disadvantages [Electronic resource]. – Access mode: <https://mcgrp.ru/article/4895-vozdushnyie-sistemyi-ohlajdeniya-pk#h1>. [in Russian].
2. Forced convection [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.heuristic.su/effects/catalog/est/byld/description/550/index.html>. [in Russian].
3. Amirouche Y. and Bessaih R. Three-Dimensional Numerical Simulation of Air Cooling of Electronic Components in a Vertical Channel. - 2012. - Vol. 8. - P. 295-309.
4. Lin J.T., Armaly B.F. and Chen T.S. Mixed convection in buoyancy-assisting, vertical backward-facing step flows. - 1990. - 33, no. 10, P. 2121-2132.
5. Yasutaka Nagano and Hirofumi Hattori. Investigation of turbulent boundary layer over forward-facing step by means of DNS. - Seoul, 2009. - P. 723-728.
6. Khanov G.V., Belkin E.B. A promising way to cool electronic devices // Proceedings of the Volgograd State Technical University. Series Progressive technologies in mechanical engineering. - 2014. - No. 21 - P. 50-52. [in Russian].
7. Kandyrin Yu.V., Hvatynets S.A. Selection of processor cooling devices in electronic equipment. – [?]. pp. 5-6. [in Russian].
8. Gnusin P.I. Study of the effectiveness of the Peltier element in various operating modes // Video science. - St. Petersburg. - 2016. - No. 1 (1). - P. 20-27. [in Russian].
9. Wang R., Qian J., Wei T. and Huang, H. (2021). Integrated closed cooling system for high-power chips. Case Studies in Thermal Engineering, 26, 100954.
10. Hassan H. and Shafey N.Y.A. (2021). 3D study of convection-radiation heat transfer of electronic chip inside enclosure cooled by heat sink. International Journal of Thermal Sciences, 159, 106585.
11. Mezrhab A., Bouali H., Amaoui H. and Bouzidi M. (2006). Computation of combined natural-convection and radiation heat-transfer in a cavity having a square body at its center. Applied Energy, 83(9), 1004–1023.

12. Hassan H. and Harmand S. (2013). A Three-Dimensional Study of Electronic Component Cooling Using a Flat Heat Pipe. *Heat Transfer Engineering*, 34(7), 596–607.
13. Isakhov A.A. *Mathematical and computer modeling of physical processes*. - Almaty, 2018. - 280 p. [in Russian].
14. Yagov V.V. Convective heat transfer [Electronic resource]. - Access mode: https://bigenc.ru/technology_and_technique/text/2088211. [in Russian].
15. Kharlamov S.N. *Algorithms for modeling hydrodynamic processes*. - Tomsk: TPU, 2008. - 36 p. [in Russian].