

Сведения о выполненных работах и полученных научных результатах
в период с 01.07.2023 г. по 30.06.2024 г.

по проекту **«Математическое моделирование сопряжённого конвективного теплообмена в трёхмерных каналах с применением многопроцессорных вычислений»**,

поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 22-79-00291

Руководитель: Гибанов Никита Сергеевич, канд. физ.-мат. наук

В результате выполнения второго этапа проекта были решены задачи сопряженной смешанной конвекции в плоских и пространственных каналах с нагревательными элементами импульсного режима работы и с выделенным ядром тепловой генерации, что позволяет моделировать различные активные системы охлаждения энергетических систем, радиоэлектронных блоков и контуров с теплонагруженными элементами. В процессе реализации второго этапа проекта были разработаны численные алгоритмы, написаны оригинальные авторские программы позволяющие проводить численные исследования физических процессов тепломассопереноса в плоских и пространственных системах. В качестве методов вычисления были выбраны метод конечных разностей, как один из самых достоверных и проверенных временем, так и решёточный метод Больмана, перспективный относительно новый метод вычислительного анализа. При реализации задачи методом конечных разностей была использована оригинальная схема с безразмерными преобразованными переменными «ротор скорости – ротор завихренности – температура», которая позволила провести сложные требовательные по ресурсам и по времени расчёты существенно быстрее чем известные коммерческие пакеты. При реализации задачи решёточным методом Больцмана был использован DDF подход с SRT аппроксимацией оператора столкновений, расчёты в пространственной постановке проведены на решётке D3Q27. На основе разработанных вычислительных моделей были проведены исследования влияния особенностей тепловыделения от источника энергии – импульсное тепловыделение в ядре источника энергии, сплошные и пористые теплоотводящие конструкции как в двумерном так и в трёхмерном приближении. Разработан тестовый вычислительный алгоритм на основе РМБ на схеме D3Q27 на ядрах видеопроцессора.

Проведен анализ влияния скорости поступающего хладагента в канал с нагревательным элементом и тепловыделяющим ядром этого элемента и рёберной системой охлаждения. При малых скоростях потока хладагента в канале наблюдается максимальный нагрев. Между ребрами образуются вихревые структуры различных ориентаций, которые оказывают влияние на интенсивность теплоотдачи. При $Re = 250$, по сравнению с $Re = 100$ наблюдается плавное снижение температуры, явно прослеживающееся на фронтальной части первого ребра. Прогрев источника энергии и рёбер в этом случае уже не однороден и становится заметна область ядра источника тепловыделения. С увеличением скорости потока увеличивается и

интенсивность вихревого движения между рёбрами, в результате чего наблюдается увеличение эффективности охлаждения рёберной системы и нагревательного элемента. При $Re = 1000$ отчётливо видны вторичные рециркуляционные потоки вблизи первого ребра, а также по две структуры между вторым и третьим. Температура в ядре нагревателя превышает температуру в остальной части источника на 24 %, причём данный показатель меняется незначительно при изменении Re . Следует отметить, что с увеличением Re наблюдается существенное снижение температуры как внутри нагревателя, так и внутри его ядра – при увеличении с $Re = 100$ до $Re = 250$ на 11 %, с $Re = 250$ до $Re = 500$ на 16 %, и с $Re = 500$ до $Re = 1000$ на 18 %.

Проведен анализ влияния высоты рёбер на интенсивность теплообмена. При небольших скоростях потока хладагента необходимо увеличивать высоту рёберной системы охлаждения для снижения температуры в источнике энергии. В то время как для $Re = 1000$ даже небольшие значения высоты способствуют эффективному теплосъёму с поверхности. При небольших высотах теплоотводящих рёбер средние температуры как внутри источника, так и в его ядре схожи по значениям, однако при дальнейшем увеличении h_r температуры существенно снижаются.

Проведен анализ влияния импульсной работы ядра нагревательного элемента на интенсивность теплообмена. Учёт импульсного характера работы нагревателя оказывает существенное влияние на значения температур в нагревателе. В зависимости от частоты меняются амплитудные значения средних температур, при этом для $Fr = 0.05$ максимальное значение в источнике $\Theta_{max} = 0.163$ и в ядре $\Theta_{max} = 0.214$, для $Fr = 0.1$ в источнике $\Theta_{max} = 0.159$ и в ядре $\Theta_{max} = 0.21$, для $Fr = 0.5$ в источнике $\Theta_{max} = 0.156$ и в ядре $\Theta_{max} = 0.205$, а в случае $Fr = 0$ в источнике $\Theta_{max} = 0.2$ и в ядре $\Theta_{max} = 0.261$. Таким образом, в зависимости от частоты работы радиоэлектронного блока (в рассмотренном диапазоне) температура в ядре и в источнике может меняться на 5 %. В случае же пренебрежения частотой отличия могут достигать для ядра источника 22.5 % и для тела источника на 22 %. При наблюдении за средними температурами в ребрах можно отметить, что температуры при движении вдоль канала по оси X возрастают, при этом амплитуды при периодическом тепловыделении затухают. Наблюдаемая максимальная разница для первого ребра составляет 23 %, а для самого прогретого третьего ребра уже 21.7 %. В отличие от средних температур, Nu_{avg} даже по амплитудным значениям для разных тактовых частот отличается незначительно – если взять средние амплитудные значения и сравнить их для различных частот Fr , то отличия будут составлять порядка 1-2%. с увеличением скорости потока хладагента увеличивается и время установления теплового баланса в полости. Сравнительный анализ данных показывает что с ростом числа Рейнольдса разница в средних температурах для случая импульсной и постоянной работы нагревателя сохраняется на уровне 22-23 %. Аналогичные заключения можно и сделать по интегральному коэффициенту теплообмена.

Проведен анализ влияния пористых теплоотводящих конструкций на интенсивность охлаждения нагревательного элемента. Проведены оценки средних

температур внутри нагревателя и средних числе Нуссельта на его поверхности при числах Рейнольдса равных 250 и 1000, а также при различных значениях пористости ε при фиксированном числе Дарси равном 0.01. При $Re = 250$ средняя температура в источнике с увеличением ε возрастает от 0.058 ($\varepsilon = 0.8$) до 0.062 ($\varepsilon = 0.85$), и далее до 0.07 ($\varepsilon = 0.9$) – таким образом, рост в относительной величине составляет 17.5 %. При том же числе Рейнольдса средняя температура в ядре источника энергии увеличилась от 0.081 до 0.097 – на 16.5 %. Среднее число Нуссельта на поверхности нагревателя также увеличивается с ростом значения ε : так при $\varepsilon = 0.8$ $Nu_{avg} = 0.2686$, при $\varepsilon = 0.85$ $Nu_{avg} = 0.3167$, при $\varepsilon = 0.9$ $Nu_{avg} = 0.4137$, таким образом, рост составил 35 %. При $Re = 1000$ средняя температура в источнике с увеличением ε возрастает от 0.0371 ($\varepsilon = 0.8$) до 0.0419 ($\varepsilon = 0.85$), и далее до 0.0517 ($\varepsilon = 0.9$) – таким образом, рост в относительной величине составляет 28.3 %.

Проведено численное моделирование сопряжённой смешанной конвекции в пространственных каналах с нагревательным элементом конечной толщины и теплоотводящими сплошными и пористыми рёбрами на их поверхности. Получены результаты при $Re = 250$ и $Re = 1000$. Средние температуры для пористых вставок и для сплошных рёбер отличаются незначительно, что обусловлено небольшой толщиной теплоотводящего ребра и его высокой теплопроводностью, а также тем, что в качестве теплоносителя рассматривалась жидкость. В случае трёхмерной постановки площадь контакта рёбер и жидкости очень высокая, и за счёт теплопроводности всё ребро успевает охладиться, причем эффект лишь на 4-5 % ниже чем в случае с пористыми рёбрами. Данная тенденция сохраняется и в случае увеличения скорости потока хладагента. Что говорит о необходимости решать пространственные задачи.

Разработан вычислительный алгоритм на основе решёточного метода Больцмана с использованием GPU. Проведена оценка полученного прироста скорости вычислений. В случае с вычислениями на CPU скорость составила 14 мин. на сетке $40 \times 120 \times 40$, 170.6 мин. на сетке $80 \times 240 \times 80$, 1938.8 мин. на сетке $120 \times 360 \times 120$ и 18922 мин. на сетке $160 \times 480 \times 160$, а в случае использования РМБ получаем 8, 81, 665.6 и 898.5 мин. соответственно.

Возможность практического использования результатов проекта:

Разработанные в результате реализации проекта программные коды могут быть использованы при проектировании и инженерных расчётах в компаниях и организациях занимающихся разработкой и модификацией энергетических блоков и созданием новых электронных устройств. Ценность полученных в результате исследований данных заключается как в фундаментальных данных - получены корреляции и функциональные зависимости параметров, так и с практической точки зрения - при необходимости решить конкретную инженерную задачу (посчитать тепловую нагрузку на узел, какой тепловой поток может снимать система охлаждения, какой хладагент или материал теплоотводящих конструкций необходимо использовать в том или ином случае). Кроме того, при определенных доработках результаты проекта можно объединить в единый программный комплекс для расчёта

потоков в двумерных и трёхмерных каналах, с учётом теплофизических свойств жидкостей и теплопроводных элементов. Разработанная вычислительная схема на GPU значительно ускоряет процессы вычисления. Особенности, связанные с учётом сопряжённого теплообмена и импульсного режима работы, значительно увеличивает точность получаемых данных. При детальной постановке задачи с помощью набора разработанных программ возможно провести расчёты и дать рекомендации по конструкции того или иного прибора.

В результате реализации проекта появились перспективы в продолжении уже начатых разработок физических моделей и возможны новые направления тем исследований. Руководитель проекта активно вовлекает в научно-исследовательскую деятельность студентов и магистрантов, как из России, так и из дружественных стран.