

АНАЛИЗ ПЕРЕНОСА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

Г. А. Пискун, Н. А. Павловец, Р. А.Скоринов

Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, nikita.pawlavets@gmail.com

This article deals with the modeling of thermal energy transfer processes in hydrodynamic environments. This research is important for the development of efficient cooling systems, especially in the context of radio electronics and mobile devices. The main heat transfer mechanisms are analyzed, as well as the numerical simulation methods applied.

Введение

Современные электронные средства обладают высокой степенью производительности и компактности, что, в свою очередь, приводит к значительным выделениям тепловой энергии. Эти факторы приводят к необходимости усовершенствования систем охлаждения, которые должны обеспечивать эффективное отведение тепла для поддержания надежной работы устройств. В условиях повышенных тепловых нагрузок, возникающих из-за миниатюризации компонентов и увеличения их функциональности, корректный и обоснованный выбор системы охлаждения становится критически важным [1 – 3].

Данная статья направлена на рассмотрение особенностей переноса тепловой энергии в гидродинамической среде, в частности, в системах жидкостного охлаждения (СЖО) высоконагруженных процессоров.

Общая характеристика

Системы охлаждения являются ключевыми элементами в оптимизации теплового режима работы электронных средств (ЭС). Их проектирование строится на понимании процессов теплопроводности, конвекции и испарения, с использованием различных холодоносителей (воздуха, жидкостей, хладагентов и т.д.), каждый из которых имеет свои особенности.

Классификация систем по типу холодоносителя и физическим явлениям помогает выявить их преимущества и ограничения. Воздушные системы широко распространены из-за доступности, но их эффективность снижается при высоких температурах. Жидкостные системы обеспечивают более высокую интенсивность теплоотведения, но требуют сложной инфраструктуры.

Основными преимуществами использования жидкостей являются:

– высокая теплоемкость, так как жидкости, как правило, обладают большей теплоемкостью, чем воздух, что позволяет им поглощать большее количество тепла при меньших изменениях температуры;

– эффективная теплопередача, обусловленная тем, что гидродинамическая среда обеспечивает более эффективный теплообмен благодаря высокой теплопроводности. Это позволяет уменьшить температурные градиенты и обеспечивать более равномерное распределение температуры по всей системе.

– компактность СЖО, которые могут быть более компактными, чем воздушные.

Критериальные уравнения для гидродинамических систем

При разработке СЖО процесс движения жидкости можно рассматривать как 2 вида: естественный (происходит естественным образом без воздействия внешних факторов) и принудительный (происходит при использовании внешних факторов, влияющих на процесс теплообмена). Однако данные процессы наиболее эффективно описываются следующими показателями.

Число Прандтля (Pr) – это безразмерная физическая величина, которая описывает соотношение между вязкостью и теплопроводностью жидкости. Формула (1) для расчета выглядит следующим образом:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (1)$$

где ν – кинематическая вязкость ($\text{м}^2/\text{с}$), α – теплопроводность ($\text{м}^2/\text{с}$)

Число Прандтля помогает определить, когда теплопередача в жидкости будет осуществляться преимущественно за счет конвекции, а когда – за счет теплопроводности. Высокие значения указывают на большую вязкость жидкости по сравнению с ее способностью проводить тепло, что может привести к более эффективному теплоотведению.

Число Грасгофа (Gr) – это безразмерная величина, которая характеризует значимость силы тяжести по сравнению с вязкими силами в жидкости. Формула (2) для расчёта выглядит следующим образом:

$$Gr = \frac{gL^3\beta(tc - t_0)}{\nu^2}, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения ($\text{м}/\text{с}^2$), β – коэффициент объемного расширения (K^{-1}), t_c и t_0 – температуры поверхности теплообмена и теплоносителя соответственно (K), L – характерная длина (м), ν – кинематическая вязкость ($\text{м}^2/\text{с}$).

Число Грасгофа используется для анализа естественной конвекции в жидкостях, позволяя оценить, когда потоки в жидкости будут доминировать над вязкими силами. Высокие значения указывают на доминирование естественной конвекции и, соответственно, на более интенсивный теплообмен.

Число Нуссельта (Nu) – это безразмерная величина, которая характеризует эффективность переноса тепла в конвективных процессах. Формула (3) для расчета выглядит следующим образом:

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}, \quad (2)$$

где α – коэффициент конвективной теплопередачи (Вт/(м²·К)), l – характерная длина (м), λ – теплопроводность жидкости (Вт/(м·К)).

Число Нуссельта помогает оценить, насколько эффективно тепло передается от поверхности к жидкости в процессе конвекции. Высокие значения указывают на более эффективный теплообмен.

Стоит отметить, что параметры, описанные формулами (1) – (3) взаимосвязаны и часто используются в комплексном анализе теплопередачи в жидкостях. Например, число Прандтля влияет на распределение температур и скорость теплообмена и с учетом этого, можно прогнозировать, какой тип конвекции (естественная или принудительная) будет более эффективен; число Грасгофа позволяет оценить, в каких условиях естественная конвекция будет доминировать, а число Нуссельта, в свою очередь, показывает, насколько эффективно осуществляется конвективный теплообмен.

Принцип построения СЖО в радиоэлектронике

В радиоэлектронике зачастую используются СЖО, не включающие в себя процесс испарения, а работающие лишь за счет отличных теплопроводных свойств жидких хладагентов (рисунок 1).

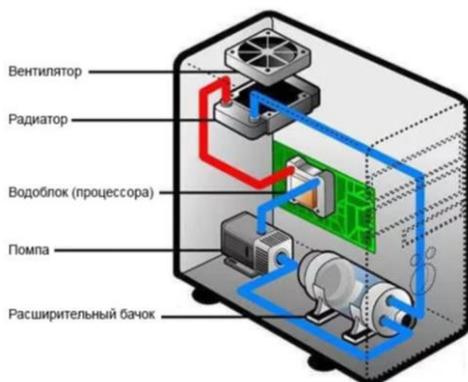


Рис. 1 – Пример построения СЖО в персональных компьютерах

В данном примере мы видим систему, в которой жидкость циркулирует за счет работы помпы через систему трубопроводов. Охлаждающая жидкость циркулирует через водоблок процессора, поглощая выделяемое им тепло. После этого жидкость попадает в радиатор, где передает тепло металлическим ребрам. Вентиляторы помогают охладить жидкость. После жидкость попадает в резервуар и цикл повторяется снова и снова.

На рисунке 2 приведена разработанная авторами трехмерная модель водоблока, разработанного в программной среде *SolidWorks Flow Simulation*.

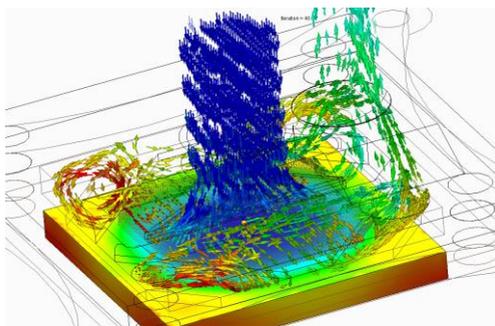


Рис. 2 – Трехмерная модель водоблока СЖО с отображением векторов турбулентного движения жидкости

Заключение

Моделирование переноса тепловой энергии в гидродинамических средах играет ключевую роль в разработке достаточно эффективных СЖО. Оно позволяет не только оптимизировать конструкции, но и улучшать их надежность и эффективность.

Список использованных источников

1. Оценка влияния длины и количества тепловых трубок на эффективность отведения избыточной тепловой энергии от процессора = Assessment of the influence of the length and number of heat pipes on the efficiency of the removal of excess thermal energy from the processor / Г. А. Пискун [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2024. – Т. 69, № 2. – С. 139–150.
2. Пискун, Г. А. Влияние конфигурации и формы внешних ребер герметичных корпусов технических средств на эффективность отведения тепла от процессора = Effect of the Configuration and Shape of External Ribs of Sealed Enclosures of Electronic Devices on Heat Removal Efficiency / Г. А. Пискун [и др.] // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2023. – Т. 26, № 5. – С. 63–75.