

Численное моделирование и экспериментальное исследование системы охлаждения на основе феррофлюидов

В.А. Помыткин¹, С.Г. Ворончихин², М.А. Земцов², А.Л. Флакман²

¹Кировский государственный медицинский университет, Киров

²Вятский государственный университет, Киров

Аннотация: Ключевым параметром любой системы охлаждения является коэффициент теплоотдачи. В статье рассматривается вопрос изучения зависимости величины термического сопротивления теплообменника системы жидкостного охлаждения на основе феррофлюидов и коэффициента теплоотдачи от параметров течения жидкости и магнитного поля в теплообменнике. Исследование проведено методом численного моделирования и теплофизического эксперимента. Особенностью рассматриваемой системы охлаждения является теплоноситель. В качестве теплоносителя используется ферромагнитная жидкость на основе магнетитов Fe_3O_4 и пропиленгликоля. В результате получена численная модель расчета коэффициента теплоотдачи для экспериментальной системы жидкостного охлаждения. Произведена оценка влияния магнитного поля на термическое сопротивление системы и коэффициент теплоотдачи стенка-жидкость при различных величинах напряжённости магнитного поля. Получена экспериментальная зависимость, показывающая рост коэффициента теплоотдачи на величину до 12,5% при воздействии магнитного поля на зону теплопередачи.

Ключевые слова: численная модель теплопередачи, система жидкостного охлаждения, уравнение Лапласа, термический менеджмент, микрочип, феррофлюид, перколяция, коэффициент теплоотдачи, нанофлюид, магнитное поле, охлаждение электроники.

Увеличение плотности тепловых потоков современных электронных компонентов [1-3] ввиду миниатюризации технологических процессов сделала низкоэффективным использование систем воздушного охлаждения (СВО)[4]. По объему публикаций перспективными являются системы жидкостного охлаждения (далее СЖО) с промежуточным теплоносителем закрытого типа, в которых наибольший исследовательский потенциал имеет задача применения новых материалов теплоносителя на основе наночастиц [5-6].

Одним из перспективных теплоносителей является семейство жидкостей с применением частиц Fe_3O_4 [7-9]. Данный класс жидкостей относится к феррофлюидам и представляет собой коллоидные смеси, состоящие из ферромагнитных частиц, взвешенных в жидкости-носителе. Хорошо изучены феррофлюиды на основе воды [10] и керосинов [11]. В данном исследовании был разработан феррофлюид на основе порошковых

магнетитов Fe_3O_4 с дисперсностью частиц 5 мкм и пропиленгликоля с массовым соотношением вещества 95%. Состав жидкости был определен экспериментально.

Оценка стабильности коллоидной жидкости позволила сделать вывод о достаточной стабильности феррофлюида без применения ПАВ ввиду олеофильности пропиленгликоля. Полученный феррофлюид сохранял стабильность в течении 72 часов наблюдения и теплофизических экспериментов.

Целью работы являлось исследование зависимости величины термического сопротивления теплообменника СЖО от скорости потока жидкости и потребляемого тока в магнитной системе. Поскольку непосредственное измерение коэффициента теплоотдачи в экспериментальной системе малого размера имеет существенные погрешности, связь термического сопротивления и среднего коэффициента теплоотдачи в теплообменнике экспериментальной системы будет установлена методом численного моделирования. Для построения численной модели рассмотрим экспериментальный стенд, 3D модель которого приведена на рис. 1. На рисунке цифрами обозначены: плата с термическим аналогом процессора 1, диамагнитный корпус теплообменника системы охлаждения 2, магнитная система теплообменника, состоящая из Ш-образного электромагнита постоянного тока 3 и стенки теплообменника 5, термически присоединенная к процессору с одной стороны и имеющая контакт с феррофлюидом с другой стороны, кольцевой канал 4 теплообменника для циркуляции феррофлюида, перистальтический трубчатый насос 6, система воздушного охлаждения теплообменника 7, состоящая из радиатора и вентилятора, заправочная трубка для компенсации объемного температурного расширения феррофлюида 8.

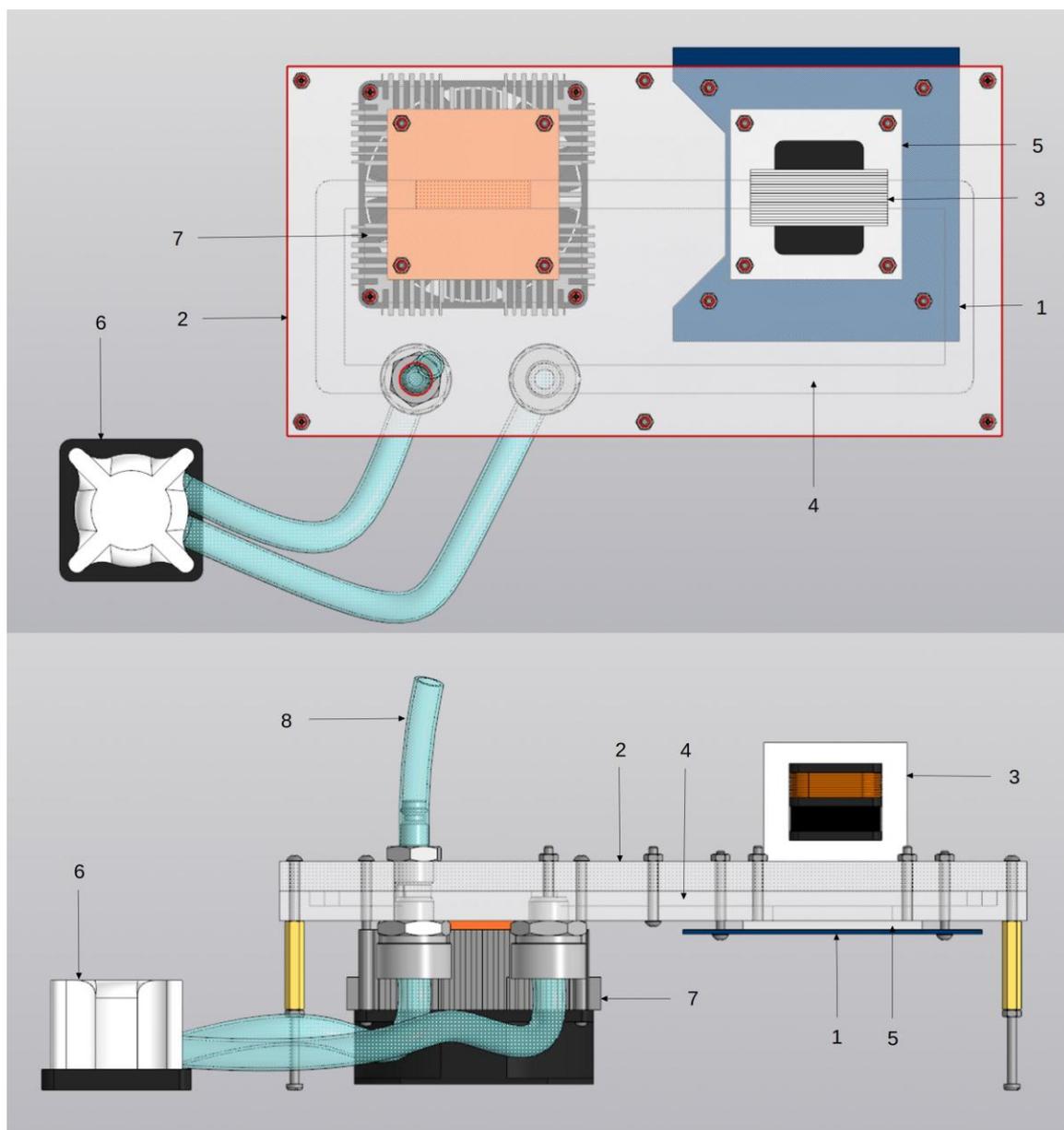


Рис. 1. – Экспериментальная установка

На рисунке не показаны система воздушного охлаждения электромагнита и электронные системы управления током магнитной системы, перистальтического насоса и электронная система, управляющая мощностью термического аналога процессора.

От поверхности крышки имитатора процессора, термически контактирующей со стенкой 5, находящейся в магнитное поле электромагнита 3, происходит процесс теплоотдачи в охлаждающую жидкость. Далее, под воздействием давления от перистальтического насоса 6, по кольцевому каналу 4, феррофлюид поступает в камеру теплообменника, термически присоединенную к системе воздушного охлаждения 7,

которая и рассеивает тепло, полученное жидкостью от процессора. При изменении тока в магнитной системе 3 в зазоре между магнитопроводом и стенкой теплообменника 5 в феррофлюиде образуются перколяции магнитных частиц, приводящие к анизотропному изменению теплопроводности в зависимости от направления линий магнитной индукции.

Для уменьшения погрешности измерений корпус теплообменника выполнен из диамагнитного материала с низкой теплопроводностью, ПММА. Магнитная система, выделяющая тепло при прохождении электрического тока, оснащена системой воздушного охлаждения. Для сохранения стабильности коллоидной жидкости-феррофлюида применена не центробежная помпа, а перистальтический насос, в котором отсутствует магнитное поле, вызывающее выпадение магнитных частиц в осадок из раствора. Размер магнитопровода - 48x20 мм, сечение - 16x20 мм, Ш-образный, 136 витков провода $\varnothing 0,5$ мм, сопротивление обмотки - 1,2 Ом. Перистальтический насос с производительностью 1,5 мл/об, со скоростью вращения от 0 до 200 об/мин и производительностью до 300 мл/мин.

Численное моделирование данной системы построено на композиции простых трехмерных моделей, описывающих термический контакт между взаимодействующими объектами. Данный метод описан применительно к воздушной системе охлаждения в [12]. Практические результаты применения данного метода к моделированию иммерсионных систем охлаждения [13] и систем охлаждения на тепловых трубах [14] показали высокую степень достоверности моделирования сложных систем теплопередачи. Поэтому для численного моделирования использована модель, описанная авторами для моделирования процессов теплопередачи в жидкостных системах охлаждения [15]. Значения параметров моделирования были заданы по данным экспериментальной установки:

- мощность полупроводникового чипа в термическом аналоге процессора $P_1 = 15 \text{ Вт}$;

- площадь S_1 полупроводникового чипа в термическом аналоге процессора 15x15 мм $S_1 = 2,25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$;

- площадь S_2 контакта стенка-жидкость в теплообменнике 10x40 мм $S_2 = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$;

- температура феррофлюида на входе в теплообменник $T_{ож} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$;

- коэффициент теплопроводности $\lambda_{проц}$ крышки термического аналога процессора $\lambda_{проц} = 394 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ во всем диапазоне измерений;

- коэффициент теплопроводности $\lambda_{ст}$ стенки теплообменника, выполненной из магнитомягкого материала $\lambda_{ст} = 20 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ во всем диапазоне измерений;

- коэффициент потерь теплоотдачи через боковую поверхность $\alpha_{бок} = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$.

В результате численного моделирования были получены сечения распределения температурного поля в термическом аналоге процессора и стенке теплообменника при различных коэффициентах теплоотдачи α (рис 2). С увеличением среднего коэффициента теплоотдачи до $1300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, происходит выравнивание температуры в зоне термического контакта «стенка теплообменника – феррофлюид». Дальнейшее увеличение коэффициента теплоотдачи приведет к снижению градиента температур между имитатором процессора и ферромагнитной жидкостью.

В результате интерполяции численной модели и экспериментальной верификации данных было найдено соотношение среднего коэффициента теплоотдачи в зоне термического контакта «процессор - стенка теплообменника» $\langle \alpha \rangle$ как разность температур между датчиком температуры, который находится в источнике тепла в термическом аналоге процессора и охлаждающей ферромагнитной жидкости следующего вида:

$$\langle \alpha \rangle = 0,83\Delta T^2 - 107\Delta T + 4057 \quad (1)$$

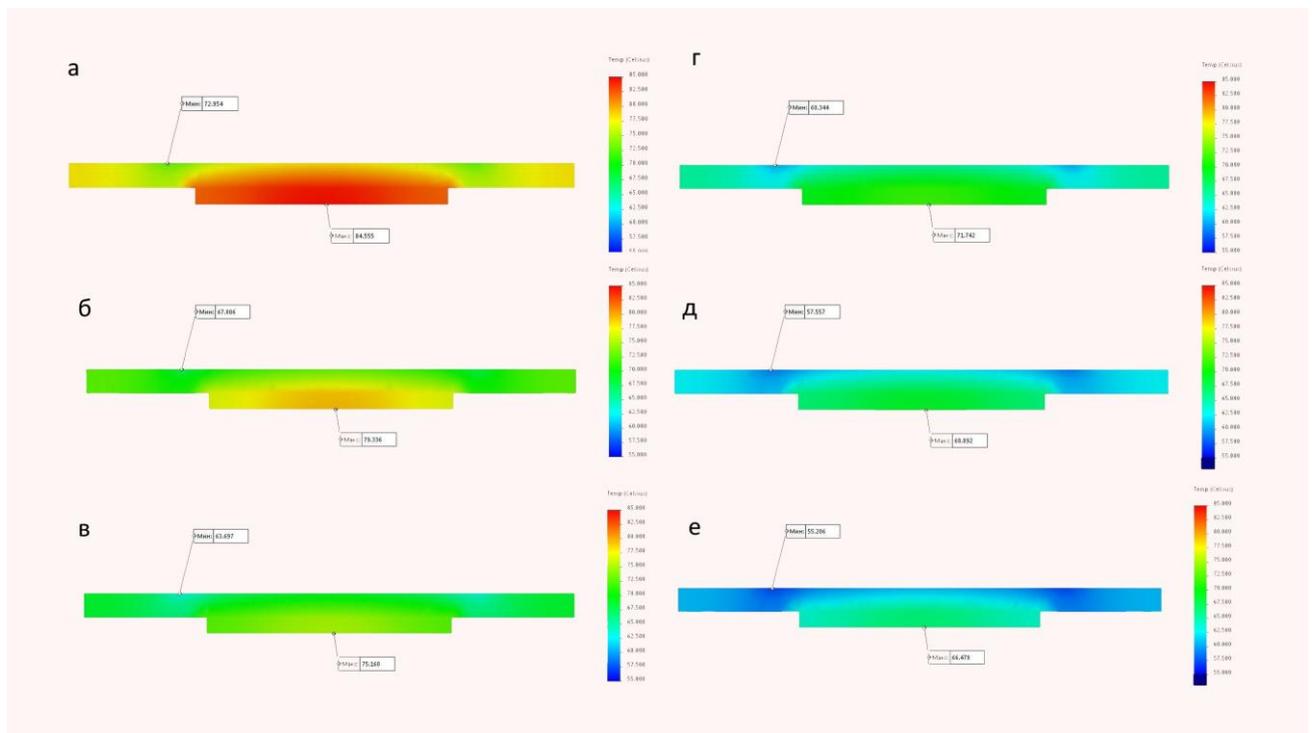


Рис. 2. – Распределение температур в зоне термического контакта «процессор - стенка теплообменника» в сечении по оси симметрии при $\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$: а)800, б)900, в) 1000, г)1100, д)1200, е)1300.

Экспериментальная фаза исследований состояла в получении зависимости значений температур в различных участках экспериментального стенда при изменении скорости течения охлаждающей жидкости и различных значениях тока электромагнита. Экспериментальная зависимость разности температур между имитатором процессора и средней температурой феррофлюида от скорости потока охлаждающей жидкости и различных значений тока электромагнита представлены на рис. 3.

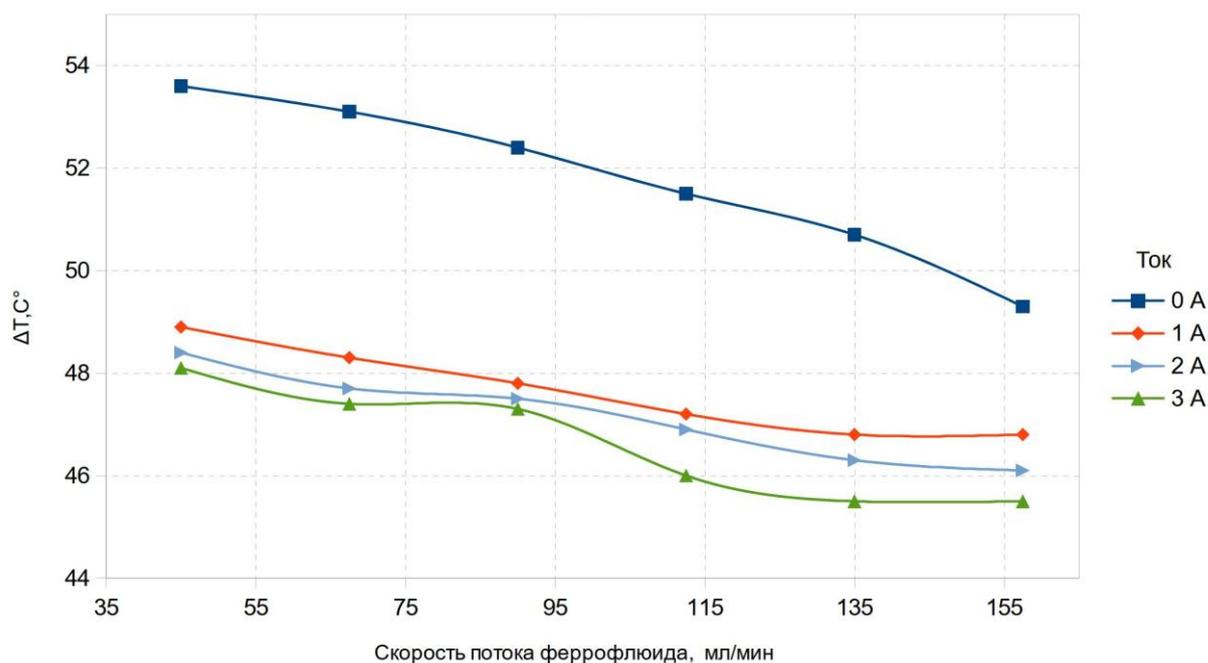


Рис. 3. – Зависимость разности температур между имитатором процессора и охлаждающей жидкостью от скорости течения жидкости и тока электромагнита.

С увеличением тока в магнитной системе происходит существенное снижение общего термического сопротивления системы охлаждения на величину до 9,9%. Изменение величины магнитного поля не приводит к изменению характера течения феррофлюида при увеличении скорости от 37 до 160 мл/мин потока. Во всем диапазоне измерений течение жидкости ламинарное.

Влияние магнитного поля на коэффициент теплопередачи является нелинейным и отражает качественный характер изменения вязкости феррофлюидов от концентрации частиц под влиянием магнитного поля.

Соотнеся результаты эксперимента и численного моделирования, получим зависимость среднего коэффициента теплоотдачи в зоне термического контакта «процессор - стенка теплообменника» экспериментального стенда от скорости течения жидкости и тока магнитной системы (рис. 4).

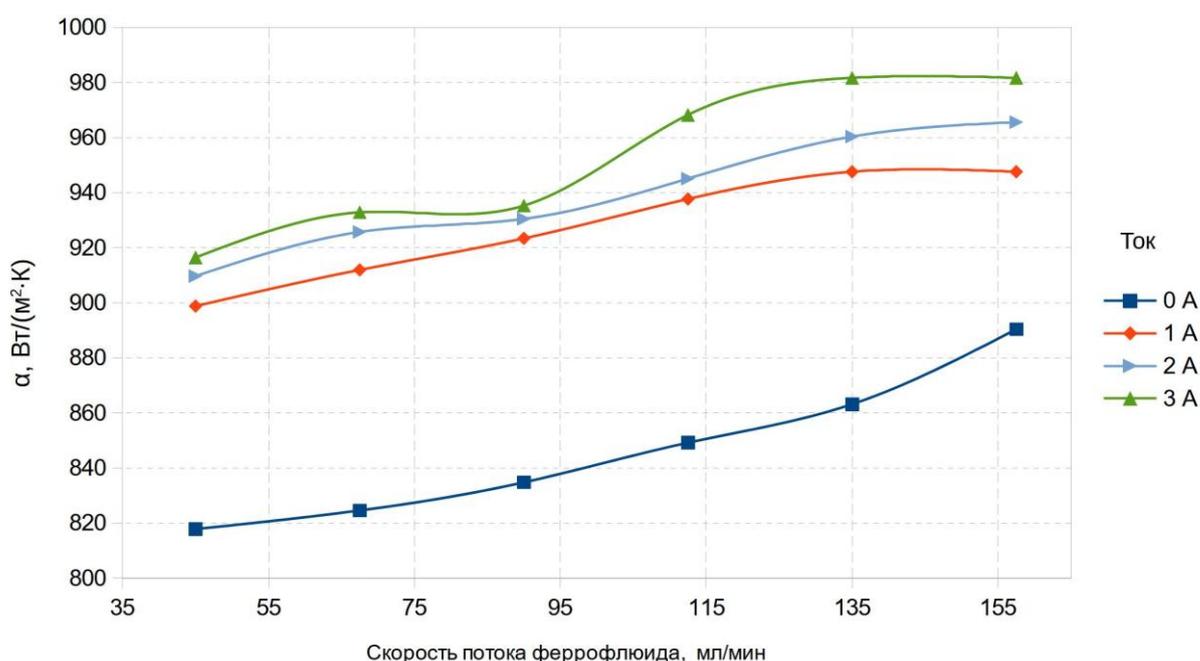


Рис. 4. – Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи в зоне термического контакта «процессор - стенка теплообменника» от скорости течения феррофлюида и тока в магнитной системе.

В результате численного моделирования и теплофизического эксперимента было получено, что для экспериментального стенда во всем диапазоне производительности перистальтического насоса происходит увеличение коэффициента теплоотдачи на величину до 12,5% при воздействии магнитным полем на зону термического контакта «теплообменник-охлаждающая жидкость». Также происходит существенное снижение общего термического сопротивления системы на величину до 9,9%. Это означает, что в описанной экспериментальной установке был достигнут эффект анизотропного увеличения теплопроводности в феррофлюиде, связанный с эффективной переносимостью тепла через перколяционные пути по частицам ферромагнетика.

Работа выполнена при поддержке гранта №19-07-00839/19

Литература

1. Lin, W., Yu T., Gao C., Liu F., Li T., Fong S., Wang Y., 2021. A Hardware-Aware CPU Power Measurement Based on the Power-Exponent Function Model for Cloud Servers. *Information Sciences* 547: 1045–1065.
 2. Azimi, R., Jing C., Reda S., 2020. PowerCoord: Power Capping Coordination for Multi-CPU/GPU Servers Using Reinforcement Learning. *Sustainable Computing: Informatics and Systems* 28: linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210537920301396.
 3. Cheung, H., Shengwei W., Zhuang C., Gu J., 2018. A Simplified Power Consumption Model of Information Technology (IT) Equipment in Data Centers for Energy System Real-Time Dynamic Simulation. *Applied Energy*, 222: 329–342.
 4. Sohel Murshed, S.M., Nieto de Castro C.A., 2017. A critical review of traditional and emerging techniques and fluids for electronics cooling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78: 821-833.
 5. Bahiraei, M., Heshmatian S., 2018. Electronics cooling with nanofluids: A critical review. *Energy Conversion and Management*, 172: 438-456.
 6. Aglawe, K.R., Yadav R.K., Thool S.B., 2021. Preparation, applications and challenges of nanofluids in electronic cooling: A systematic review. *Materials Today: Proceedings*, 43: 366-372.
 7. Shahsavari, A., Jafari M., Talebizadehsardari P., Toghraie D., 2021. Hydrothermal and entropy generation specifications of a hybrid ferronano fluid in microchannel heat sink embedded in CPUs. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 32: 27-38.
 8. Qi, C., 2020. Effects of magnetic field on thermo-hydraulic behaviors of magnetic nanofluids in CPU cooling system. *Applied Thermal Engineering*, 179: doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115717
 9. Wiriyaart, S., Suksusron P., Hommalee C., Siricharoenpanich A., Naphon P., 2021. Heat transfer enhancement of thermoelectric cooling module with nanofluid and ferrofluid as base fluids. *Case Studies in Thermal Engineering*, 24: linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214157X2100040X
 10. Веклич А.В., Ерушевич Д.А., Борисов Р.А., Рачек В.Б. Получение и применение ферромагнитной жидкости // Евразийский научный журнал. – 2017. - №2. – С. 275-277
 11. Kole, M., Khandekar S., 2021. Engineering applications of ferrofluids: A review. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 537: doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168222
-

12. Ворончихин, С.Г., Помыткин В.А., Земцов М.А., Флакман А.Л. Численное моделирование процессов теплопередачи систем охлаждения микрочипов // Научное обозрение: Москва: Издательский дом "Наука образования". - 2013. - №3. - С. 51-55
13. Ворончихин С.Г., Помыткин В.А., Земцов М.А., Флакман А.Л. Исследование процесса теплопередачи в погружной системе охлаждения суперЭВМ // Инженерный вестник Дона, 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3853
14. Ворончихин, С.Г., Помыткин В.А., Земцов М.А., Флакман А.Л. Моделирование процесса теплопроводности в системе охлаждения микрочипов на тепловых трубах // Научное обозрение: Москва: Издательский дом "Наука образования". - 2014. - №11/1. - С. 76-83.
15. Помыткин В.А., Ворончихин С.Г., Земцов М.А., Флакман А.Л. Исследование процесса теплопередачи в системе жидкостного охлаждения ЭВМ на основе феррофлюидов // Инженерный вестник Дона, 2019, №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6242

References

1. Lin W., Yu T., Gao C., Liu F., Li T., Fong S., Wang Y., 2021. A Hardware-Aware CPU Power Measurement Based on the Power-Exponent Function Model for Cloud Servers. Information Sciences 547: 1045–1065.
 2. Azimi R., Jing C., Reda S., 2020. PowerCoord: Power-Capping Coordination for Multi-CPU/GPU Servers Using Reinforcement Learning. Sustainable Computing: Informatics and Systems 28: URL: linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210537920301396.
 3. Cheung H., Shengwei W., Zhuang C., Gu J., 2018. A Simplified Power Consumption Model of Information Technology (IT) Equipment in Data Centers for Energy System Real-Time Dynamic Simulation. Applied Energy, 222: 329–342.
 4. Sohel Murshed S.M., Nieto de Castro C.A., 2017. A critical review of traditional and emerging techniques and fluids for electronics cooling. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 78: 821-833.
 5. Bahiraei M., Heshmatian S., 2018. Electronics cooling with nanofluids: A critical review. Energy Conversion and Management, 172: 438-456.
-



6. Aglawe K.R., Yadav R.K., Thool S.B., 2021. Preparation, applications and challenges of nanofluids in electronic cooling: A systematic review. *Materials Today: Proceedings*, 43: 366-372.
7. Shahsavari, A., Jafari M., Talebizadehsardari P., Toghraie D., 2021. Hydrothermal and entropy generation specifications of a hybrid ferronano fluid in microchannel heat sink embedded in CPUs. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 32: 27-38.
8. Qi, C., 2020. Effects of magnetic field on thermo-hydraulic behaviors of magnetic nanofluids in CPU cooling system. *Applied Thermal Engineering*, 179: URL: doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115717
9. Wiriyasart, S., Suksusron P., Hommalee C., Siricharoenpanich A., Naphon P., 2021. Heat transfer enhancement of thermoelectric cooling module with nanofluid and ferrofluid as base fluids. *Case Studies in Thermal Engineering*, 24: URL: linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214157X2100040X
10. Veklich A.V., Erushevich D.A., Borisov R.A., Rachek V.B. *Evraziyskiy nauchnyy zhurnal*. 2017. №2. pp. 275-277
11. Kole, M., Khandekar S., 2021. Engineering applications of ferrofluids: A review. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 537: doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168222
12. Voronchikhin S.G., Zemtsov M.A., Pomytkin V.A., Flaksman A.L. *Nauchnoe obozrenie*: Moscow: Izdatel'skiy dom "Nauka obrazovaniya". 2013. №3. pp. 51-55.
13. Voronchikhin S.G., Zemtsov M.A., Pomytkin V.A., Flaksman A.L. *Inzhenernyy vestnik Dona*, 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3853
14. Voronchikhin S.G., Pomytkin V.A., Zemtsov M.A., Flaksman A.L. *Nauchnoe obozrenie*: Moscow: Izdatel'skiy dom "Nauka obrazovaniya". 2014. №11/1. pp. 76-83.
15. Voronchikhin S.G., Zemtsov M.A., Pomytkin V.A., Flaksman A.L. *Inzhenernyy vestnik Dona*, 2019, №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6242