

Исследование процесса теплопередачи в системе жидкостного охлаждения ЭВМ 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: Задача обеспечения оптимальных тепловых режимов для электронной аппаратуры в настоящее время не теряет своей актуальности. Распространенным вариантом современных систем охлаждения являются жидкостные системы с теплоносителем на основе воды. В работе рассматривается возможность применения в качестве теплоносителя ферромагнитной жидкости. Для исследования данного теплоносителя был разработан теплообменник системы жидкостного охлаждения и проведено теоретическое численное моделирование температурных полей в нем. Далее в статье приведены результаты экспериментального исследования зависимостей разницы температур между источником тепла и охлаждающей жидкостью на основе феррофлюида при различных скоростях помпы и разных потоков магнитной индукции. Получены зависимости коэффициента теплоотдачи на поверхности стенки - феррофлюид теплообменника жидкостной системы охлаждения при различных скоростях помпы и разных потоков магнитной индукции. Анализ практических результатов позволил сделать выводы об адекватности численной модели экспериментальным данным и выявленных зависимостях влияния магнитного поля на коэффициент теплоотдачи данного материала.

Ключевые слова: процессор, уравнение Лапласа, жидкостная система охлаждения, феррофлюид, наномангнитная жидкость, теплообмен, коэффициент теплоотдачи.

Задачи обеспечения нормального теплового режима работы радиоэлектронной аппаратуры являются актуальными в гонке современных технологий литографии. С уменьшением размеров электронных компонентов произошло увеличение плотности тепловой энергии с эффективной единицы площади микрочипа при повышении их производительности. Уменьшение размеров привело к увеличению суммарного теплового потока с микрочипа из-за большего количества вычислительных ядер при одинаковой суммарной площади корпуса. Поэтому большинство современных систем охлаждения являются жидкостными [1].

Системой жидкостного охлаждения называется система охлаждения, в которой охлаждение электронных компонентов происходит в процессе тепломассобмена с использованием жидкого теплоносителя [2]. В практике

применения в замкнутых СЖО [3] распространёнными охлаждающими жидкостями являются водные растворы этиленгликоля и пропиленгликоля, а в иммерсионных системах СЖО применяются также масла, фторкетоны и фторацетоны.

С целью увеличения надежности СЖО, применяются магнитогидродинамические насосы без движущихся частей [4]. В качестве охлаждающих жидкостей таких СЖО служат металлические теплоносители на основе эвтектических расплавов лекоплавких металлов [5] или феррофлюиды. Феррофлюиды (ферромагнитные жидкости) представляют собой коллоидный раствор магнитных частиц в жидкости на основе водных или масляных жидкостей. Феррофлюиды обладают рядом свойств [6-8], которые делают перспективным их применение в качестве теплоносителя в СЖО. Во-первых, это высокий коэффициент теплопроводности, создаваемый как за счет заполнения коллоидного раствора частицами магнетита, так и за счет построения в магнитном поле цепочек наночастиц с высокой теплопроводностью, так называемыми перколяциями. Во-вторых, эти жидкости обладают способностью к транспорту в суперпозиции магнитного и температурного поля, или эффектом термомагнитной конвекции. В-третьих, под воздействием магнитного поля наноманитная жидкость будет менять физико-химические свойства, например, вязкость и смачивание. Сочетание данных факторов позволяет исследовать на этих жидкостях системы охлаждения, использующие одновременно и свойства теплопроводности, и свойства переноса рабочего тела ферромагнитной жидкости, а также требуют изучения влияния магнитного поля на коэффициент теплоотдачи в теплообменнике системы охлаждения. Практические реализации таких систем охлаждения приведены в [9].

Ключевой особенностью рассматриваемых систем охлаждения является теплообменник. Теплообменник СЖО, использующий в качестве

теплоносителя ферромагнитную жидкость представлен на рис. 1. Охлаждающая жидкость поступает в камеру теплообменника 1. На поверхности упаковки процессора, контактирующей со стенкой 2, происходит процесс теплоотдачи в охлаждающую ферромагнитную жидкость, проходящую через магнитное поле в зазоре между магнитопроводом 6 и стенкой 2.

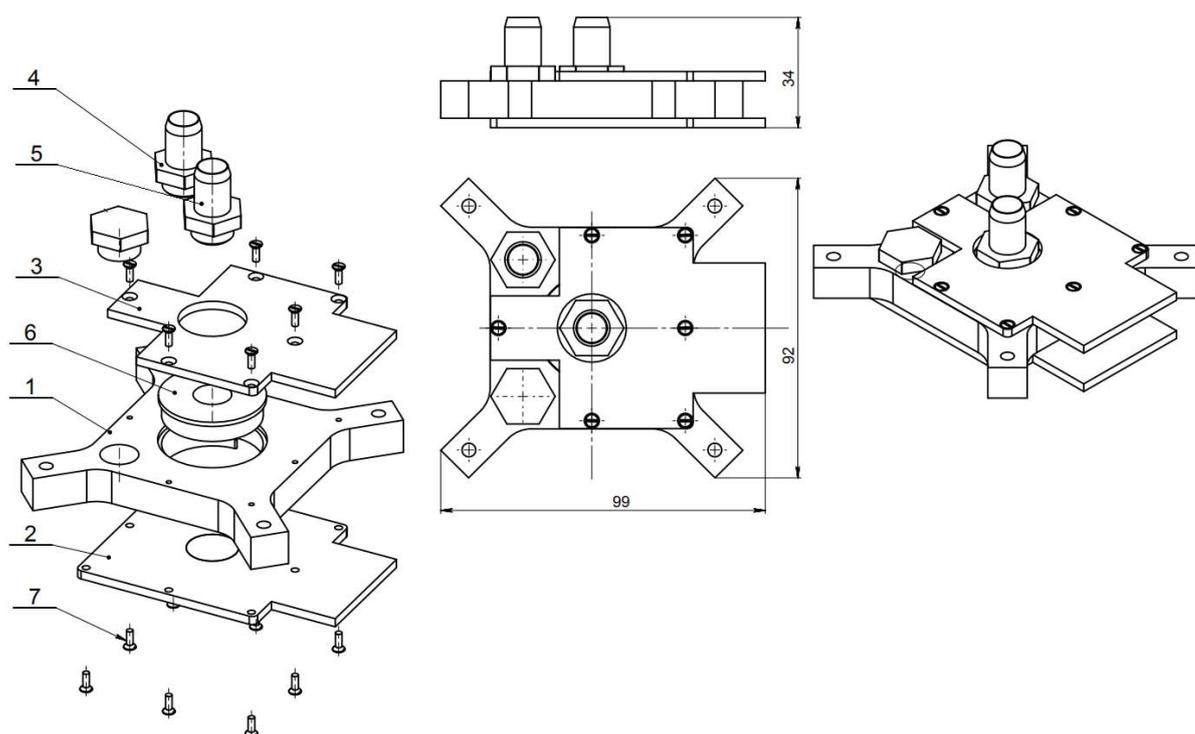


Рис. 1. – Теплообменник системы жидкостного охлаждения на основе феррофлюидов, включающий: немагнитный корпус с камерой 1, стенка теплообменника, присоединяемая к процессору и электромагниту, из магнитомягкой нержавеющей стали 2, стенка теплообменника, присоединяемая к электромагниту, из магнитомягкой нержавеющей стали 3, штуцеры для вывода 4 и ввода 5 жидкости, магнитопровод 6, элементы крепления 7.

Целью статьи является исследование зависимости процесса теплоотдачи и величины термического сопротивления теплообменника СЖО на основе ферромагнитных жидкостей от параметров течения жидкости и магнитного поля.

Для оценки и дальнейшего изучения процессов теплообмена в ферромагнитных жидкостях была разработана численная модель расчёта теплофизических параметров теплообменника. В качестве исходной модели был использован метод трёхмерного расчёта тепловых потоков в системах охлаждения процессоров, предложенный авторами и подробно рассмотренный в работе [10]. В работе [11] предложены практические результаты использования этого метода. Процесс теплопередачи в случае жидкостного охлаждения процессора идет по пути полупроводниковый кристалл процессора – упаковка процессора – стенка теплообменника – жидкость системы охлаждения. Процесс теплопередачи в зонах контактов задавался через граничные условия второго и третьего рода соответственно [12].

Для численной модели были заданы следующие граничные условия:

- мощность точечного источника теплового потока имитирующего современный микрочип $P_1 = 25Вт$;
- площадь поверхности контакта точечного источника имитатора микрочипа с упаковкой $S_2 = 2,25 \cdot 10^{-4} м^2$
- диаметр камеры теплообменника $D_2 = 0.02м$;
- температура охлаждающей жидкости $24 °С$.

Для удобства расчёта коэффициент теплопроводности верхней крышки процессора был задан постоянным и равным коэффициенту теплопроводности меди. Коэффициент теплопроводности нижней стенки теплообменника, выполненной из магнитомягкого материала, равным коэффициенту теплопроводности нержавеющей стали.

Задача решалась методом конечных элементов с использованием среды SolidWorks Simulation [13].

Результаты распределения температурного поля по сечению по оси симметрии в упаковке процессора и стенке теплообменника в зависимости от величины коэффициента теплоотдачи представлены на рис 2.

Для экспериментального исследования системы жидкостного охлаждения на основе феррофлюидов была приготовлена жидкость состава этиленгликоль 48%, вода дистиллированная 48%, порошок магнетита дисперсностью 5мкм 3%, ПАВ 1%. Состав жидкости был определен после выпадения осадка в течение 24 часов и взвешивания осадка.

Для создания магнитного поля теплообменник помещался в зазор П-образного электромагнита с индуктивностью $0,615 Гн$. Через обмотку электромагнита пропускался ток I значением $0А$; $1,6А$; $3,2А$. Поток магнитной индукции B составлял при этом соответственно $0Вб$; $0,492Вб$; $0,984Вб$.

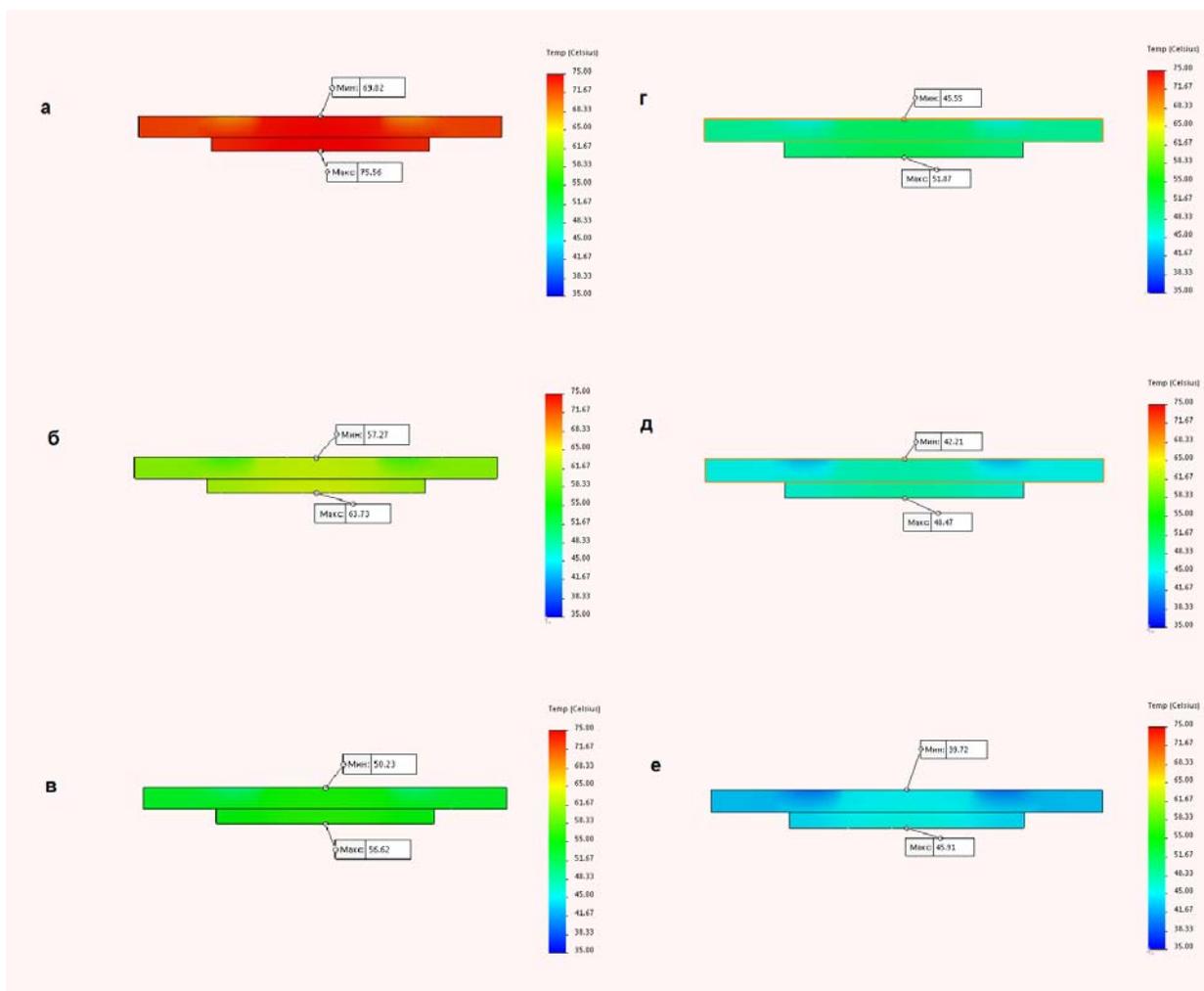


Рис. 2. – Теоретическое распределение температурного поля по сечению по оси симметрии в упаковке процессора и стенке теплообменника зависимости от величины коэффициента теплоотдачи $\alpha [Вт/(м^2 \cdot К)]$: а) 750, б) 1000, в) 1250, г) 1500, д) 1750, е) 2000.

Для создания потока жидкости через теплообменник использовалась помпа Alphacool DC-LT с паспортным расходом 120 литров в час при 3600 об/мин. Источник тепла мощностью 25 Вт, температура охлаждающей жидкости 24°C. Серии эксперимента повторялись три раза. Результаты экспериментального исследования зависимости разницы температур между источником тепла и охлаждающей жидкостью на основе феррофлюида при

варьируемых скорости помпы и потоке магнитной индукции приведены на рис. 3.

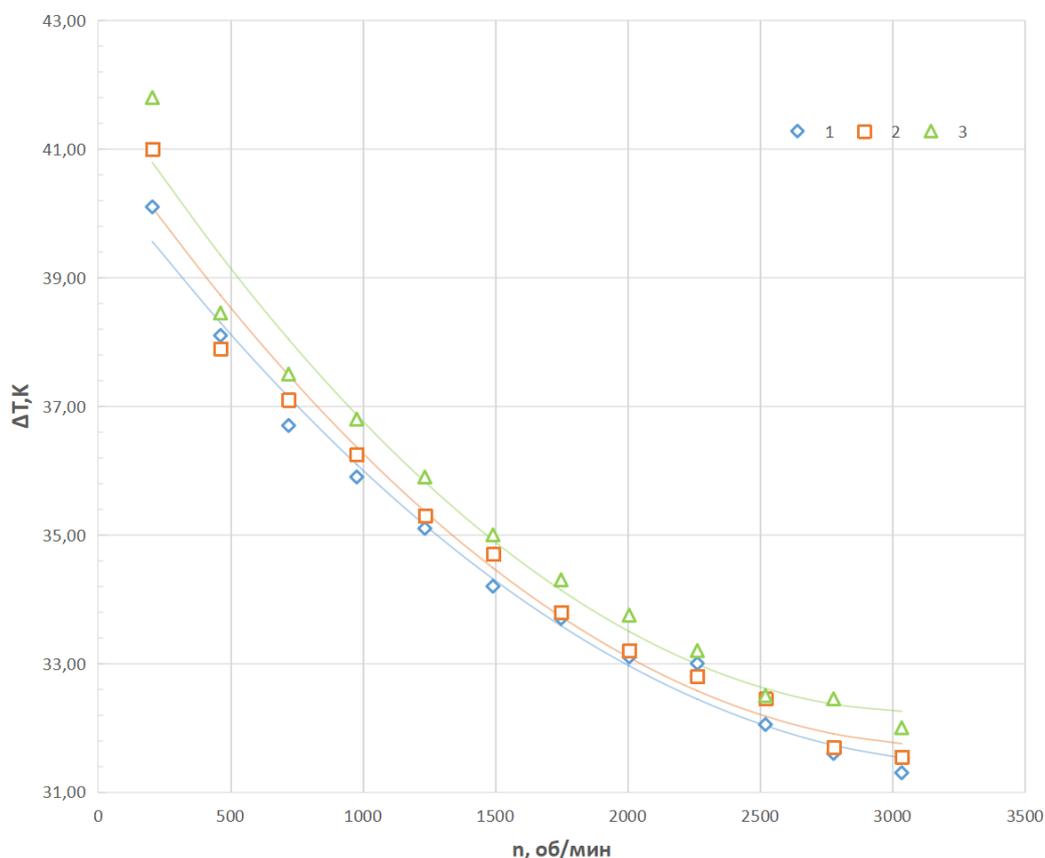


Рис. 3. – График зависимости разницы температур между источником тепла и охлаждающей жидкостью на основе феррофлюида при различных скоростях помпы и потоке магнитной индукции В 1) 0Вб; 2) 0,492Вб; 3) 0,984Вб.

Результаты теплофизического эксперимента по исследованию зависимости разности температур кристалла процессора и охлаждающей жидкости на основе феррофлюида с концентрацией частиц магнетита 3% показали, что во всем диапазоне скоростей помпы от 240 до 3050 об/мин при увеличении потока магнитной индукции от 0 до 0,984 Вб происходит увеличение термического сопротивления системы. Термическое сопротивление для одного и того же значения скорости помпы в среднем увеличивается на 2,1%.

Соотнося результаты эксперимента и результаты численного моделирования процессов теплопередачи в теплообменнике, можно получить зависимость среднего коэффициента теплоотдачи на поверхности стенка-феррофлюид теплообменника жидкостной системы охлаждения и зависимости от различных скоростей помпы и потоке магнитной индукции. Эти результаты приведены на рис. 4.

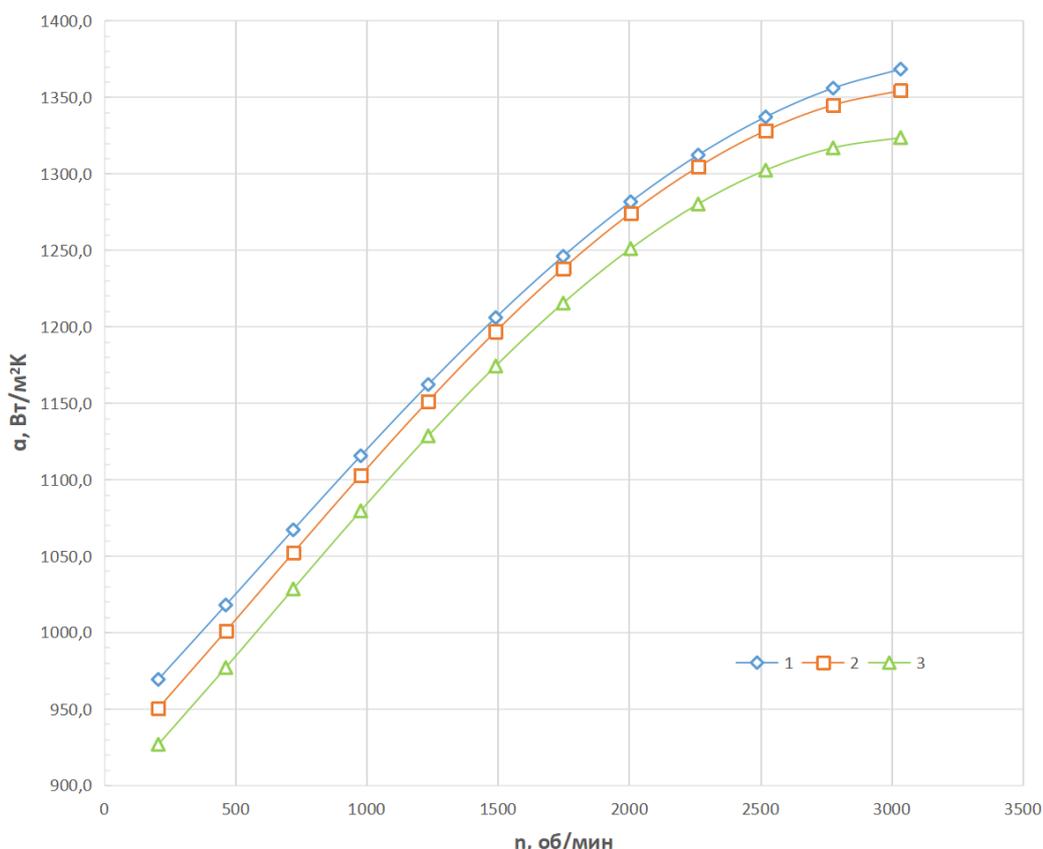


Рис. 4. – График зависимости среднего коэффициента теплоотдачи α на поверхности стенка- феррофлюид теплообменника жидкостной системы охлаждения при различных скоростях помпы и потоке магнитной индукции
В 1) 0Вб; 2) 0,984Вб; 3) 1,968Вб.

Из результатов численного моделирования и теплофизического эксперимента можно сделать вывод о влиянии магнитного поля на процессы теплообмена в системе жидкостного охлаждения процессоров ЭВМ на базе

ферромагнитной жидкости. Следует обратить внимание на связь коэффициента вязкости феррофлюида и коэффициента теплоотдачи.

Коэффициентами переноса называют коэффициенты вязкости, теплопроводности и диффузии. Это название указывает на то, что коэффициенты характеризуют перенос в теле соответствующей физической величины: коэффициент вязкости характеризует перенос импульса. Коэффициент теплоотдачи в данном случае характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и охлаждающей жидкостью и учитывает конкретные условия протекания этого процесса. В отличие от коэффициентов теплопроводности и температуропроводности, коэффициент теплоотдачи не является теплофизической характеристикой вещества, его определение возможно в результате теплофизического эксперимента. Наиболее существенное влияние на величину оказывают коэффициент теплопроводности, удельная теплоёмкость, плотность, динамическая и кинематическая вязкость жидкости. Также увеличение вязкости приводит к увеличению толщины пограничного слоя. Термическое сопротивление пограничного слоя является определяющим в процессах конвективного теплообмена [14].

Результаты теплофизического эксперимента по исследованию зависимости коэффициента теплоотдачи между стенкой теплообменника и охлаждающей жидкости на основе ферромагнитной жидкости с концентрацией частиц магнетита 3% показали, что во всем диапазоне скоростей помпы от 240 до 3050 об/мин при увеличении потока магнитной индукции от 0 до 0,984 Вб происходит уменьшение коэффициента теплоотдачи. Коэффициент теплоотдачи для одного и того же значения скорости помпы в среднем снижается на 3,1%.

Увеличение толщины пограничного слоя за счёт увеличения вязкости охлаждающей жидкости в магнитном поле нужно учитывать при изучении

жидкостных систем охлаждения процессоров ЭВМ на основе ферромагнитной жидкости. Здесь есть два фактора: зависимость вязкости феррофлюидов от концентрации частиц и фактор увеличения пограничного слоя при течении феррофлюидов при изменении вектора потока магнитного поля.

Эйнштейном установлена зависимость вязкости коллоидного раствора от концентрации взвешенных частиц.

$$\eta = \eta_0(1 + \alpha \cdot j),$$

где α – коэффициент, зависящий от формы частиц. Для частиц круглой формы $\alpha = 2,5$; для удлиненных частиц $\alpha > 2,5$. j - объемная доля дисперсионной фазы. η_0 – вязкость дисперсионной среды.

Причиной увеличения толщины пограничного слоя следует рассматривать процессы взаимодействия ферромагнитных частиц и их влияния на свойства феррофлюидов в магнитном поле.

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

Литература

1. Khalaj, A.H. and S.K. Halgamuge, 2017. A Review on efficient thermal management of air- and liquid-cooled data centers: From chip to the cooling system. Applied Energy, 205: 1165-1188.
2. Глазунова Л. В. Система термостабилизации в приемо-передающей аппаратуре // Инженерный вестник Дона, 2012, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/759.
3. Sohel Murshed, S.M. and C.A. Nieto de Castro, 2017. A critical review of traditional and emerging techniques and fluids for electronics cooling. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 78: 821-833.



4. US Patent App. 20160116223A1, США, F28D15/00. Ferrohydrodynamic thermal management system and method. / Carpenter Brandon, Wachob Jonathan, Crisman Keith, Hopper Matt, Pessatore Dustin, McDeed Ben.

5. Авраамов, Ю.С., Шляпин А.Д. Сплавы специального назначения на основе систем с органической растворимостью в жидком состоянии // Машиностроение и инженерное образование. - 2004. - №1. - С. 38-50.

6. Katsikis, G., Cybulski, J. & Prakash, M. Synchronous universal droplet logic and control. Nature Phys 11, 588–596 (2015) doi: 10.1038/nphys3341.

7. Helmenstine, Anne Marie, Ph.D. "How to Make Liquid Magnets." ThoughtCo. Date Views 18.12.2019 thoughtco.com/how-to-make-liquid-magnets-606319.

8. Damodaran P., P. John, 2011. Tuning of Thermal Conductivity and Rheology of Nanofluids Using an External Stimulus. The Journal of Physical Chemistry C. 115. 20097. doi.org/10.1021/jp204827q.

9. Zanella, R., 2019. Thermomagnetic Convection in Ferrofluids: Finite Element Approximation and Application to Transformer Cooling, PhD thesis, Universite Paris-Saclay, Paris.

10. Ворончихин, С.Г., Помыткин В.А., Земцов М.А., Флакسمан А.Л. Численное моделирование процессов теплопередачи систем охлаждения микрочипов // Научное обозрение: Москва: Издательский дом "Наука образования". - 2013. - №3. - С. 51-55.

11. Pomytkin V., Pomytkin I., Verteletsky P. Thermal spreader for heat pipe coolers and water coolers. Pat. Korea 1020107007118 (2007.09.17). Date views 15.12.2019 doi.org/10.8080/1020107007118?Urlappend=en.

12. Ворончихин С.Г., Помыткин В.А., Земцов М.А., Флакسمан А.Л. Исследование процесса теплопередачи в погружной системе охлаждения суперЭВМ // Инженерный вестник Дона, 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3853



13. Kurowski, P., 2019. Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2019. SDC Publications, pp: 161-177.

14. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: учебник для теплоэнерг. вузов. - М.:Энергия, 1981. - 416 с.

References

1. Khalaj, A.H. and S.K. Halgamuge, 2017. A Review on efficient thermal management of air- and liquid-cooled data centers: From chip to the cooling system. Applied Energy, 205: 1165-1188.

2. Glazunova L.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/759.

3. Soheli Murshed, S.M. and C.A. Nieto de Castro, 2017. A critical review of traditional and emerging techniques and fluids for electronics cooling. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 78: 821-833.

4. US Patent App. 20160116223A1, США, F28D15/00. Ferrohydrodynamic thermal management system and method. Carpenter Brandon, Wachob Jonathan, Crisman Keith, Hopper Matt, Pessatore Dustin, McDeed Ben.

5. Avraamov, Yu.S, Shlyapin A.D. Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie. 2004. №1. pp. 38-50.

6. Katsikis, G., Cybulski, J. & Prakash, M. Synchronous universal droplet logic and control. Nature Phys 11, 588–596 (2015) doi: 10.1038/nphys3341.

7. Helmenstine, Anne Marie, Ph.D. "How to Make Liquid Magnets." ThoughtCo. Date Views 18.12.2019 thoughtco.com/how-to-make-liquid-magnets-606319.

8. Damodaran P., P. John, 2011. The Journal of Physical Chemistry C. 115. 20097. doi.org/10.1021/jp204827q.

9. Zanella, R., 2019. Thermomagnetic Convection in Ferrofluids: Finite Element Approximation and Application to Transformer Cooling, PhD thesis, Universite Paris-Saclay, Paris.



10. Voronchikhin S.G., Zemtsov M.A., Pomytkin V.A., Flaksman A.L. Nauchnoe obozrenie: Moskva: Izdatel'skiy dom "Nauka obrazovaniya". 2013. №3. pp. 51-55.

11. Pomytkin V., Pomytkin I., Verteletsky P. Thermal spreader for heat pipe coolers and water coolers. Pat. Korea 1020107007118 (2007.09.17). Date views 15.12.2019 doi.org/10.8080/1020107007118?Urlappend=en.

12. Voronchikhin S.G., Zemtsov M.A., Pomytkin V.A., Flaksman A.L. Inzhenernyj vestnik Dona, 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3853

13. Kurowski, P., 2019. Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2019. SDC Publications, pp: 161-177.

14. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Teploperedacha: uchebnik dlya teploenerg. vtuzov [Heat transfer: the textbook for technical colleges] Moskva. Energiya, 1981. 416 p.