

УДК 536.248

Разработка контурного термосифона с 3D-печатной развитой микроструктурированной поверхностью испарителя*

Ю.В. Люлин¹, М.М. Афонин², Д.Г. Фирсов², С.А. Евлашин², А.В. Дедов¹

¹*Национальный исследовательский университет МЭИ, Москва*

²*Сколковский институт науки и технологий, Москва*

E-mail: LiulinYV@mpei.ru

Представлены результаты разработки и экспериментальных исследований контурного термосифона с 3D-печатной развитой микроструктурированной поверхностью теплообмена в плоском испарителе и этанолом в качестве теплоносителя. Исследованы тепловые характеристики устройства в диапазоне температур от 20 до 128 °С при тепловых нагрузках от 25 до 530 Вт и степени заполнения 40 мл (100 % объема испарителя). Установлено, что для столбчатой микроструктурированной поверхности теплообмена испарителя наименьшее значение полного термического сопротивления составляет 0,18 К/Вт, оно соответствует максимальному подводимому тепловому потоку — 530 Вт. Показано, что развитая столбчатая структура внутренней теплообменной поверхности испарителя существенно повышает эффективность контурных термосифонов.

Ключевые слова: контурные термосифоны, кипение, конденсация, аддитивные технологии, трехмерная печать, фазовые переходы, интенсификация теплообмена.

Контурные термосифоны (КТС) являются высокоэффективными двухфазными теплопередающими устройствами, которые могут использоваться в системах охлаждения различных микроэлектронных и силовых устройств (чипы, светодиодная техника, лазеры, радары, конверторы и инверторы и др.), поскольку позволяют отводить значительные тепловые потоки при минимальных температурных перепадах между теплонапряженными элементами и стоком теплоты. КТС работают по замкнутому испарительно-конденсационному циклу, где перенос сконденсированной жидкости в испаритель происходит за счет силы гравитации. Поэтому в отличие от контурных тепловых труб в контурных термосифонах нет необходимости создания капиллярно-пористых структур. Данный факт может существенным образом сократить стоимость системы охлаждения с использованием КТС. В то же время существуют ограничения по работе КТС в зависимости от расположения и условий работы оборудования относительно вектора силы тяжести. Тем не менее огромное множество микроэлектронного оборудования находится в стационарных условиях, например, дата-центры, стационарные ПК, светодиодная техника и др., где КТС являются перспективными решениями теплоотвода.

* Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 19-19-00410).

Исследованиям по применению КТС для охлаждения дата-центров и суперкомпьютеров уделяется повышенное внимание [1]. В работе [2] рассматривалась возможность и целесообразность использования контурных термосифонов для охлаждения светодиодных (LED) светильников с целью повышения их надежности и экономичности. Публикации [3, 4] посвящались исследованию работы КТС и возможности их применения для охлаждения дата-центров. Среди различных подходов к изготовлению пассивных двухфазных теплопередающих устройств аддитивные технологии (АТ) можно рассматривать как один из самых перспективных. Аддитивная технология — это технология с применением трехмерной (3D) печати. Она имеет ряд преимуществ, которые позволяют разрабатывать системы управления тепловым процессом следующего поколения. Основным из них является усовершенствование пассивных двухфазных теплообменников с небольшими ограничениями или без ограничений на их конструкцию, что позволяет создавать объемные поверхности теплообмена сложной формы с оптимизированной геометрией, выполнять прямой перевод CAD/CFD (Computer-Aided Design/Computation Fluid Dynamics) моделей в физические прототипы, осуществлять снижение веса и сборку деталей без дополнительных контактных поверхностей/стыков и промежуточных сборочных единиц. Другим преимуществом 3D-печати является быстрое изготовление прототипа, при котором время между проектным замыслом и физической реализацией устройства значительно сокращается. Подробный анализ и обзор современного состояния аддитивных технологий, представленный в рамках их использования в создании теплопередающих устройств, приведен в работах [5, 6].

Целью настоящей работы является разработка контурного термосифона с использованием аддитивных технологий и экспериментальное исследование влияния микроструктурированной поверхности в испарителе на теплопередающие характеристики КТС.

Для исследования теплопередающих свойств контурного термосифона был разработан экспериментальный стенд, представленный на рис. 1. Методики проведения экспериментов были апробированы в работах [7, 8]. Установка состоит из измерительной системы, рабочего участка, контура водяного охлаждения, системы вакуумирования.

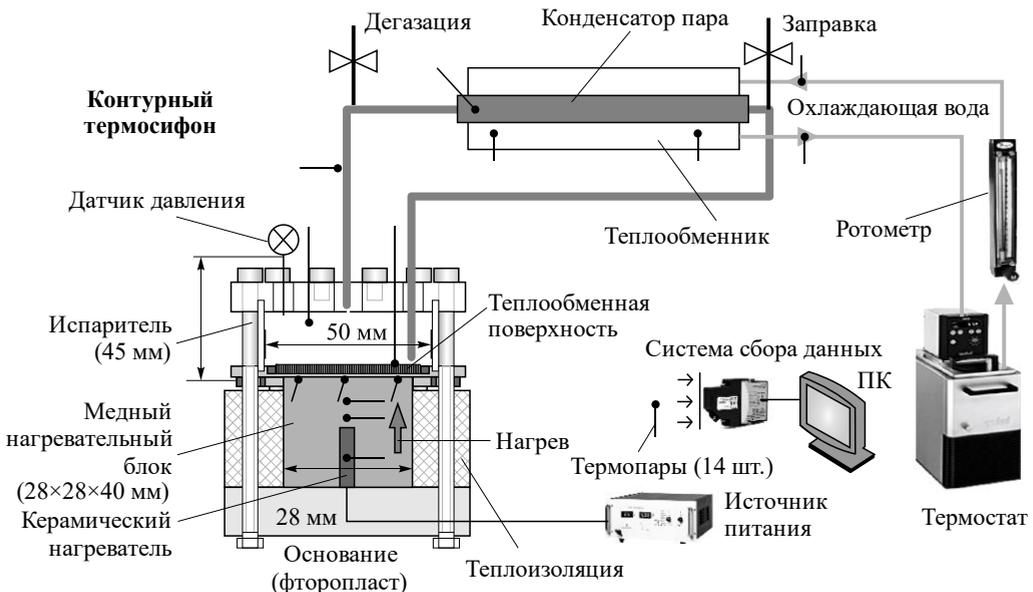


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Контурный термосифон включает в себя испаритель и конденсатор, которые соединены между собой трубками из нержавеющей стали, предназначенными для движения пара и жидкости. Расстояние между уровнями испарителя и конденсатора составляет 30 см. В качестве конденсатора используется алюминиевая трубка с продольным оребрением. Охлаждение конденсатора происходит с помощью специального теплообменника за счет циркуляции воды из термостата. Испаритель состоит из корпуса и подложки с гладкой или развитой структурированной поверхностью столбчатого типа (рис. 2). Боковая стенка и верхняя крышка корпуса выполнены из прозрачного поликарбоната. Корпус и подложки соединяются между собой посредством болтов через фторопластовую прокладку, что обеспечивает герметичность испарителя. В крышке корпуса предусмотрены отверстия под фитинги, позволяющие подсоединять трубки для пара и жидкости, датчик давления, а также осуществлять ввод термопар для измерения температуры внутри испарителя. Высота испарителя составляет 45 мм. Прозрачные стенки дают возможность наблюдать за режимами кипения внутри испарителя. Внешние габариты испарителя и крепления соответствуют стандартным размерам систем охлаждения процессоров стационарных и серверных компьютеров. Таким образом, в экспериментах могут использоваться подложки, изготовленные с применением различных технологий.

С помощью трехмерного металлического принтера Trumpf TruPrint 100 [9] были напечатаны две подложки из алюминия диаметром 65 мм: первая — с массивом столбиков (высота каждого — 2,5 мм, диаметр — 0,5 мм, межстолбчатое расстояние — 0,5 мм), вторая — с гладкой поверхностью. Тепловая нагрузка осуществлялась с помощью нагревательного элемента. Нагревательный элемент включает в себя медный блок, в специальный вырез которого плотно вставлялся керамический нагреватель. Максимальная тепловая мощность нагрева составляла 580 Вт, размер торца нагревательного элемента — $28 \times 28 \text{ мм}^2$. Для лучшего теплового контакта между поверхностями испарительной секции, нагревателя и охлаждающей пластины теплообменника использовалась термопаста. Температура нагревательного блока изменялась в диапазоне 25–200 °С и измерялась с погрешностью не более 0,1 °С с использованием высокоточного измерительного модуля NI 9214 и термопар К-типа диаметром 0,5 мм. Плотность теплового потока определялась двумя различными методами. Первый метод заключался в измерении перепада температур в двух различных сечениях по длине нагревателя. Для этой цели были созданы специальные глухие отверстия, предназначенные для ввода термопар по высоте в нагревательных блок. Второй способ заключался в измерении полной мощности джоулевой

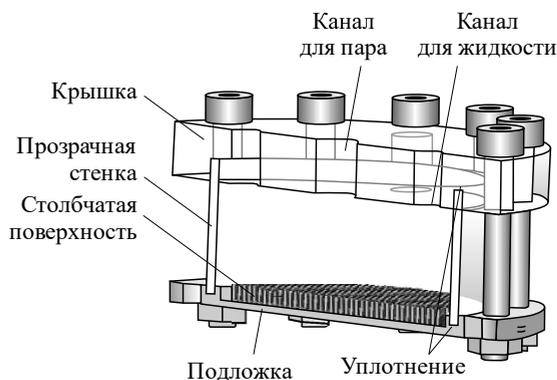


Рис. 2. Устройство испарителя.

теплоты. Тепловая мощность задавалась источником питания постоянного тока. Разница в определении теплового потока двумя методами не превышала 10 %. Полное термическое сопротивление рассчитывалось по формуле: $R_{\text{tot}} = (T_e - T_c)/Q$, где T_e — температура стенки испарителя в зоне нагрева, °С, T_c — средняя температура конденсатора, °С, Q — тепловая нагрузка от источника тепла, Вт.

С целью измерения полного термического сопротивления контурного термосифона в зависимости от тепловой нагрузки была проведена серия экспериментов. В качестве рабочей жидкости использовался этиловый спирт. Тепловая нагрузка изменялась от 25 до 530 Вт. Степень заполнения КТС составляла 40 мл или 100 % от объема испарителя. После заправки КТС жидкостью с помощью вакуумного насоса производилась дегазация. В процессе эксперимента часть жидкости конденсировалась в трубке конденсата, а также заполняла внутренний объем трубки жидкостной линии. С увеличением тепловой мощности и интенсивности кипения уровень жидкости в испарителе составлял от 10 до 50 %. На рис. 3 показаны зависимости полного термического сопротивления от подводимого к испарителю теплового потока для гладкой и столбчатой теплообменных поверхностей. В исследуемом испарителе контурного термосифона имеют место различные механизмы переноса теплоты, такие как естественная конвекция, пузырьковое кипение и испарение. Они зависят от тепловой нагрузки и уровня жидкости в испарителе. Из рис. 3 видно, что кривая для столбчатой структуры показывает наименьшее значение полного термического сопротивления — 0,18 К/Вт. Оно соответствует величине максимального подводимого теплового потока — 530 Вт. Максимальная температура нижней стенки испарителя составила 128 °С. При использовании гладкой теплообменной поверхности в испарителе полное термическое сопротивление оказалось выше по сравнению со случаем столбчатой поверхности и составило 0,41 К/Вт. Это значение термического сопротивления получено для тепловой мощности 384 Вт и является максимальным отводимым для гладкой поверхности. Дальнейшее увеличение теплового потока для гладкой

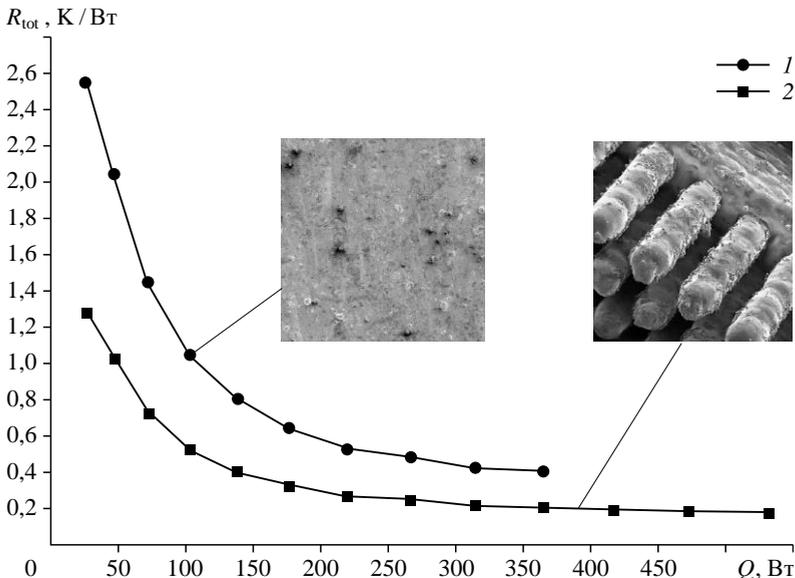


Рис. 3. Зависимость полного термического сопротивления КТС от теплового потока для гладкой и столбчатой теплообменных поверхностей испарителя.
1 — гладкая поверхность, 2 — столбчатая поверхность.

поверхности теплообмена приводит к кризису теплообмена и переходу к пленочному режиму кипения. Температура в нагревательном блоке резко повышается и превышает максимальную допустимую рабочую температуру, равную 200 °С.

Уменьшение полного термического сопротивления КТС при использовании развитой микроструктурированной поверхности в испарителе связано в первую очередь с интенсификацией процесса теплообмена при кипении жидкости. Существует несколько факторов, повышающих теплопередачу при кипении. Так, площадь теплообмена многократно увеличивается за счет использования массива столбиков. Происходит разделение путей притока жидкости к нагреваемой теплообменной поверхности и отвода пара от нее. Данный факт приводит к увеличению гидродинамической устойчивости восходящего течения пара от поверхности в столбиках и поддержке постоянно действующих центров парообразования [10]. Поверхности при 3D-печати имеют высокую шероховатость, поскольку спекаются сферические частички металлического порошка, тем самым образуя условия для устойчивых и многочисленных центров парообразования.

Таким образом, выявлено, что среднее значение термического сопротивления для гладкой поверхности подложки испарителя ниже, чем для структурированной. Теплообменная поверхность с массивом трехмерных печатных столбиков улучшает теплообмен при кипении в испарителе. В работе продемонстрировано, что развитая столбчатая структура внутренней теплообменной поверхности испарителя существенно повышает эффективность контурных термосифонов.

Список литературы

1. Васильев Л.Л., Майданик Ю.Ф. Двухфазные теплопередающие контуры // Тепловоы процессы в технике. 2022. Т. 14, № 10. С. 434–446.
2. Кисеев В., Аминев Д., Черкашин В., Мурзин Р. Двухфазные теплопередающие системы для охлаждения светодиодных светильников // Полупроводниковая светотехника. 2011. Т. 3, № 11. С. 27–31.
3. Zou S., Zhang Q., Yue C., Du S. Effect of servers' arrangement on the performance of a loop thermosyphon system used in data center // Applied Thermal Eng. 2021. Vol. 192. P. 116955-1–116955-16.
4. Tong Z., Zang G. Effect of the diameter of riser and downcomer on an CO₂ thermosyphon loop used in data center // Applied Thermal Eng. 2021. Vol. 182. P. 116101-1–116101-4.
5. McDonough J. A perspective on the current and future roles of additive manufacturing in process engineering, with an emphasis on heat transfer // Thermal Sci. and Eng. Progress. 2020. Vol. 19. P. 100594-1–100594-29.
6. Jafari D., Wits W. The utilization of selective laser melting technology on heat transfer devices for thermal energy conversion applications: a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 91. P. 420–442.
7. Mohseni-Gharyehsafa B., Lyulin Y., Evlashin S.A., Kabov O., Ouerdane H. Characterization and performance of a 3D-printed two-phase closed thermosyphon // Thermal Sci. and Eng. Progress. 2021. Vol. 28. P. 101001-1–101001-18.
8. Kuznetsov G.V., Ponomarev K.O., Feoktistov D.V., Orlova E.G., Lyulin Y.V., Ouerdane H. Heat transfer in a two-phase closed thermosyphon working in polar regions // Thermal Sci. and Eng. Progress. 2021. Vol. 22. P. 100846-1–100846-15.
9. Fedorenko A., Fedulov B., Kuzminova Y., Evlashin S., Staroverov O., Tretyakov M., Lomakin E., Akhatov I. Anisotropy of mechanical properties and residual stress in additively manufactured 316L Specimens // Materials. 2021. Vol. 14, No. 23. P. 7176–7192.
10. Дедов А.В. Обзор современных методов интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении // Теплоэнергетика. 2019. Т. 12. С. 18–54.

*Статья поступила в редакцию 23 ноября 2023 г.,
после доработки — 5 декабря 2023 г.,
принята к публикации 11 апреля 2024 г.*