

электронный журнал

МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Издатель ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»

УДК 536.248.2

05.14.00

А.А. Якомаскин

Исследование работы испарителя контурной тепловой трубы

МГТУ им. Н.Э. Баумана
yak40@bk.ru

Введение

Контурные тепловые трубы (КТТ) - это теплопередающие устройства, работающие по закрытому испарительно-конденсационному циклу и использующие капиллярные силы для транспортировки теплоносителя. Данные устройства нашли успешное применение в системах терморегулирования космических аппаратов. Дальнейшее развитие КТТ связано с их миниатюризацией, поскольку в настоящее время в сфере электронной техники существует острая потребность в создании компактных теплопередающих устройств, способных передавать тепловые потоки высокой плотности, свыше 100 Вт/см^2 . Классические тепловые трубы (ТТ) и контурные тепловые трубы – это те устройства, которые призваны выполнить данную задачу. Первые уже широко внедрены в электронную промышленность, практически каждый современный ноутбук или стационарный компьютер снабжаются ТТ. Вторые, широко используемые в системах охлаждения космических аппаратов, также могут найти применение в электронной технике, т.к. они обладают

некоторыми преимуществами перед классическими ТТ. Во-первых, наличием отдельных каналов для пара и жидкости, которые представляют собой гладкостенные трубки малого диаметра без пористого материала внутри, что позволяет укладывать их, изгибая, как это необходимо в условиях жестких пространственных ограничений, накладываемых конструкторами. Во-вторых, испаритель КТТ имеет более эффективную структуру и работает по схеме с перевернутым мениском, что снижает термосопротивление испарителя, т.к. теплота подводится непосредственно к испаряющим менискам, тогда как в классических ТТ тепловой поток должен преодолеть слой пористого материала, насыщенного жидкостью, прежде чем доберется до поверхности испарения.

Однако, на пути внедрения КТТ в область охлаждения компактных электронных устройств стоит ряд препятствий, таких как существенная толщина испарителя (по сравнению с классическими ТТ). А попытки создать тонкие испарители сталкиваются с проблемой возникновения утечек теплоты из зоны испарения в компенсационную полость (КП), что не позволяет создать необходимый перепад температур, а, следовательно, и давлений между испарителем и КП.

Авторы [1] создали компактные КТТ для охлаждения электронных компонентов, а для того, чтобы компенсировать тепловые утечки в КП, установили дополнительное охлаждающее устройство для КП, потребляющее электроэнергию. Разработанные КТТ имели цилиндрический испаритель диаметром 7 мм.

Авторы [2] создали компактную КТТ с плоским испарителем толщиной 5 мм. В работе было отмечено, что при низких тепловых потоках КТТ обладают большим термосопротивлением по сравнению с классическими ТТ и даже с однофазным охлаждением. Причина этого в том, что конструктивно КП совмещена с испарителем в одном корпусе. Такое размещение позволяет обеспечить постоянную смачиваемость фитиля жидкостью и регулировать изменение объема жидкости в КТТ при различных тепловых потоках. Однако при таком размещении фитиль является тепловой связью между испарителем и КП, что приводит к значительным

перетечкам теплоты в КП через насыщенную жидкостью пористую среду, что в конечном итоге повышает рабочую температуру КТТ.

Одним из способов уменьшить утечки теплоты является использование фитиля с низкой теплопроводностью.

Большая часть опубликованных работ посвящена КТТ с фитилями из металлических порошков, сеток или волокон. Лишь единицы работ описывают фитили из неметаллов (керамика, пластик, бумага).

В [3] автор исследовал влияние схемы организации пароотводных каналов на процессы теплообмена в испарителе. Эксперименты показали, что наиболее эффективной является теплоподводящая поверхность с развитой системой радиальных и окружных пароотводных каналов. Автор отметил, что технологически сложно выполнить на поверхности каналы размером менее 500 мкм, однако эксперименты показали, что эффективность испарителя растет по мере уменьшения размера каналов и увеличения их частоты. Автор также рассмотрел влияние толщины фитиля на характеристики испарителя. Все используемые фитили были металлическими. Было экспериментально определено, что оптимальным является фитиль с толщиной от 4 до 7 мм в зависимости от различных конфигураций КТТ.

Основные функции, которые выполняет фитиль:

1) подпитка жидкостью зоны испарения, которая может находиться как на поверхности фитиля, обращенной к греющей поверхности, так и на определенном заглублении внутри его;

2) обеспечение гидравлического барьера для пара, т.е. предотвращение попадания пара в КП;

3) обеспечение «теплового затвора», т.е. препятствование возникновению больших тепловых потоков по направлению от зоны испарения в КП.

Все эти функции связаны с теплофизическими свойствами фитиля и теплоносителя, размером пор, пористостью, проницаемостью и его геометрическими характеристиками. Согласно пункту 3, одним из способов сделать КТТ более эффективными является использование фитилей с низкой теплопроводностью.

Авторы [4] рассмотрели фитили различной теплопроводности и определили, что нетеплопроводные фитили работают лучше при низких тепловых потоках, а теплопроводные – при высоких. Это объясняется тем, что при высоких нагрузках наступает капиллярный предел для самых напряженных менисков, которые находятся в месте контакта фитиля с греющей поверхностью. Причем у нетеплопроводного фитиля интенсивно испаряющие мениски сосредоточены в более узком пристеночном слое, а у теплопроводного они распределены равномерней по высоте фитиля. Вследствие этого отступление менисков вглубь фитиля, т.е. его пересыхание у нетеплопроводного фитиля начинается раньше и проникает на большую глубину. Такое осушение капилляров приводит к дополнительным потерям давления, которые повышают температуру КТТ и ее термическое сопротивление.

Авторы [5] создали КТТ с цилиндрическим испарителем и фитилем из пластика, обозначив основные преимущества неметаллических фитилей:

- 1) низкая теплопроводность;
- 2) низкая стоимость;
- 3) высокая технологичность;
- 4) малый вес;
- 5) простота сборки.

Авторы также отметили и недостатки:

- 1) ограничение по температуре;
- 2) недолговечность;
- 3) усадка.

Авторы [6] представили миниатюрную КТТ с фитилем из фильтровальной бумаги толщиной 1.9 мм для проведения экспериментов по исследованию теплообмена в испарителе. Результаты экспериментов показали, что конфигурации КТТ с бумажным фитилем и микроканалами эффективно работает и поддерживает температуру испарителя на уровне 80 °С при тепловой нагрузке 70 Вт.

Для исследования эффективности работы различных нетеплопроводных фитилей в испарительной зоне в данной работе была создана открытая в атмосферу

система испарителя КТТ. Впервые исследовались фитили толщиной менее 1 мм, изготовленные из стекловолокна. Научная новизна работы заключается в том, что неметаллические фитили с низкой теплопроводностью способны обеспечивать такую же эффективность работы испарителя как и металлические фитили, но обладают при этом существенно меньшей толщиной.

1 Экспериментальная установка

Открытая в атмосферу система испарителя КТТ позволяет производить быструю смену исследуемых образцов фитилей и микроканальных пластин и производить быструю сборку и разборку испарителя. Схема представлена на рисунке 1.

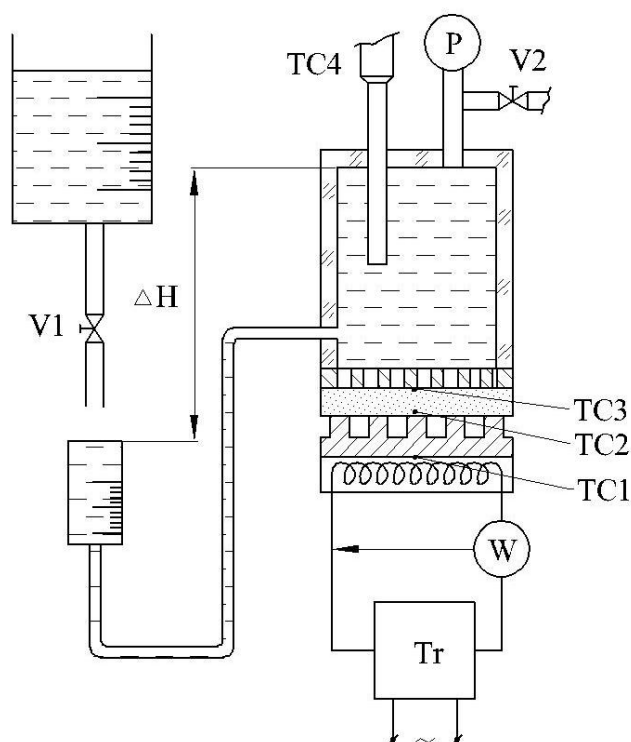


Рис. 1. Схема установки

V1, V2 – вентили; Tr – Трансформатор; P – датчик вакуума; W – ваттметр;
TC1 - TC4 – термопары; ΔH – перепад высот

Жидкость подается из резервуара, находящегося сверху через вентиль V1, в буфер подачи жидкости, который находится ниже, чем компенсационная полость. В

буфере жидкость поддерживается на постоянном уровне, чтобы обеспечить постоянный перепад давления. При этом абсолютный уровень давления в КП контролируется датчиком давления, расположенным в верхней части КП. С помощью буфера можно также измерять расход жидкости, если поддерживать уровень жидкости в буфере на постоянном уровне и отмечать объем жидкости, уходящий в испаритель, по шкале резервуара, засекая при этом время. В таблице представлены характеристики исследуемых фитилей.

Таблица 1 - Материалы фитилей

Материал	Размер пор, мкм	Толщина, мм
Фильтровальная бумага (FP) ГОСТ 12026-76	10	0.5
Нержавеющая сталь (SS) спеченный порошок	10-15	2.5
Стекловолокно (GF)	2.6	0.4

2 Процедура эксперимента

Перед запуском необходимо полностью заполнить КП жидкостью, создать перепад уровней жидкости между КП и буфером и проверить герметичность КП. Для этого после сборки установки буфер устанавливался так, чтобы уровень жидкости в нем был выше, чем уровень дренажного вентиля V2. Далее производилось заполнение системы водой из резервуара. В эксперименте была использована дистиллированная дегазированная вода. Когда при заправке вода начинала вытекать через дренажный вентиль, последний перекрывался, и буфер жидкости опускался на необходимый уровень ниже верхнего края жидкости в КП. Такая разность уровней позволяла создавать разрежение в КП, регистрируемое с помощью датчика вакуума, обеспечивая условия в фитиле, близкие к замкнутой КТТ. Как уже было сказано, в испарителе КТТ фитиль является гидравлическим барьером: на стороне фитиля, обращенной к нагревающей поверхности, создается

высокое давление из-за испарения жидкости. А на противоположной стороне фитиля, обращенной в компенсационную полость, давление ниже из-за того, что в КП находится холодная жидкость, поступающая из конденсатора.

Тепловая нагрузка создавалась плоским керамическим нагревателем толщиной 2.5 мм и размерами 19 мм на 19 мм, который был подключен к лабораторному трансформатору и ваттметру. Тепловая нагрузка варьировалась от 20 до 140 Вт с шагом 20 Вт. Термопары типа хромель-копель были установлены, как показано на рисунке 1. Термопара ТС4 находилась в компенсационной полости около отверстия входного штуцера и допускала вертикальное перемещение. Термопара ТС3, представляющая собой спай плоских проводов суммарной толщиной 30 мкм, находилась непосредственно на впитывающей поверхности фитиля. Такая же плоская термопара ТС2 была установлена внутри фитиля. Для измерения температуры пара, выходящего из паровых каналов, использовалась отдельная термопара, которая имела возможность перемещаться вдоль края микроканальной пластины, обеспечивая считывание данных о температуре пара с различных частей пластины. Данные с термопар и датчика вакуума считывались при помощи устройства Lcard LTR27 и передавались на компьютер. Погрешность измерения температур составляла 0.5 градуса. Погрешность измерения давления составляла 100 Па.

В ходе экспериментов были использованы медные микроканальные пластины, получаемые методом деформирующего резания [7], со следующей конфигурацией: шаг ребер 0.6 мм, расстояние между ребрами 0.3 мм, высота ребер 1.0 мм.

Экспериментально регистрировались показания термопар и датчика вакуума. На рисунке 2 представлена зависимость температуры поверхности нагревателя ТС1 от тепловой нагрузки для исследованных фитилей. Видно, что на всех тепловых режимах фитиль из стекловолокна позволял получить меньшую температуру нагревающей поверхности. Для фильтровальной бумаги были проведены эксперименты только на режимах 20-60 Вт, т.к. при более высоких тепловых нагрузках установка не выходила на режим, температура постоянно росла.

3 Результаты эксперимента

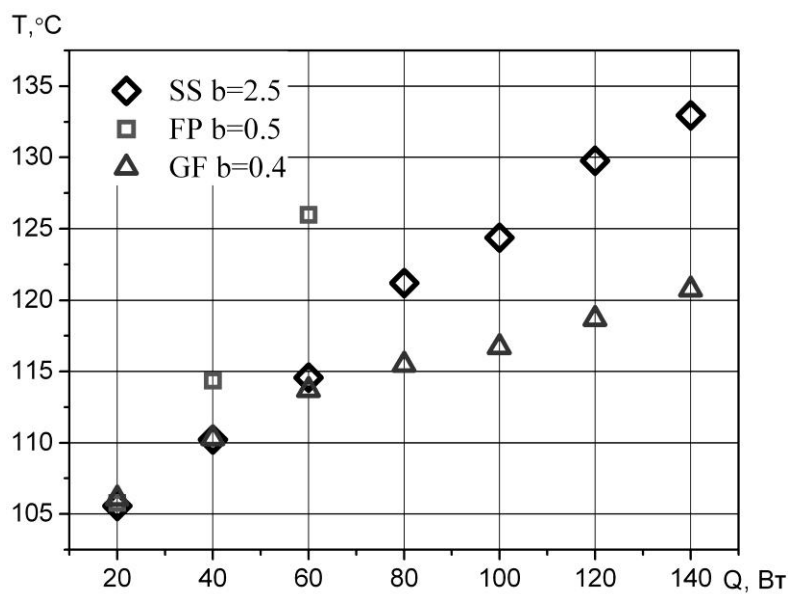


Рис. 2. Температура поверхности нагревателя ТС1

На рисунке 3 представлена зависимость разности температур нагревателя ТС1 и впитывающей поверхности фитиля ТС3 от тепловой нагрузки.

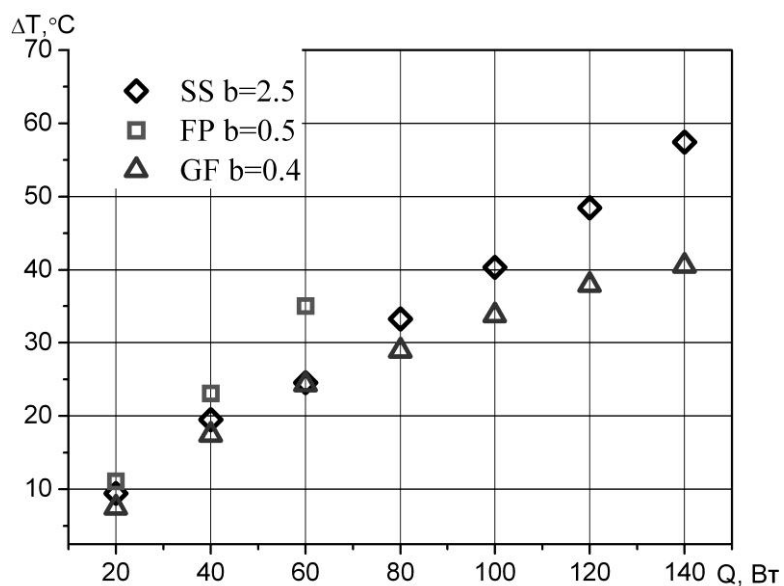


Рис. 3. Разность температур нагревателя и впитывающей поверхности фитиля

Видно, что эта разность при низких тепловых потоках для неметаллических фитилей практически не отличается от разности температур у металлического фитиля притом, что толщина неметаллических фитилей существенно меньше. Надо отметить, что вышеуказанная разность температур ΔT имеет ключевое значение в работе контурной тепловой трубы. Величина входит во второе условие работоспособности КТТ, сформулированное в работе [8], которое выражается следующим приближенным соотношением:

$$\left. \frac{dP}{dT} \right|_{T_V} \Delta T \cong \sum \Delta P_{Ext}$$

Заключение

В данной работе была разработана и создана экспериментальная установка для исследования процессов тепломассопереноса в испарителе контурной тепловой трубы. Проведена серия экспериментов с использованием фитилей с различными геометрическими и теплофизическими свойствами.

Пористые материалы из стекловолокна размером пор 2.6 мкм являются более эффективными (испаритель работает при меньшей температуре) по сравнению с металлическим фитилем размером пор 10 мкм из порошка нержавеющей стали, который тоже имеет низкий коэффициент теплопроводности по сравнению с другими металлами. Поэтому использование материалов с низким коэффициентом теплопроводности в качестве фитиля позволит создать более эффективные тонкие испарители КТТ.

Литература

1. Pastukhov V. G., Maydanik Y.F. Low-noise cooling system for PC on the base of loop heat pipes. Applied Thermal Engineering, №27, 2007. pp. 894-901.
2. R. Singh, A. Akbarzadeh, M. Mochizuki. Thermal Potential of Flat Evaporator Miniature Loop Heat Pipes for Notebook Cooling. IEEE TRANSACTIONS

3. Кисеев В.М. Тепломассоперенос и фазовые превращения в мелкопористых капиллярных структурах : диссертация ... доктора физико-математических наук : 01.04.14. – Екатеринбург, 2001.

4. Долгирев Ю.Е., Майданик Ю.Ф., Ферштатер Ю.Г. Влияние теплопроводности фитиля на температуру антигравитационной тепловой трубы // Фазовые превращения в метастабильных системах. АН СССР. Свердловск, 1983. с 23-27.

5. Hosei Nagano, Hiroyuki Ogawa, Fuyuko Fukuyoshi, Hiroki Nagai. Fabrication and testing of a small loop heat pipe with a plastic wick. International Conference “Heat pipes for space application”. Moscow, October 2009.

6. A.A. Yakomaskin, D.N. Morskoy, V.N. Afanasiev. Feasibility study of loop heat pipes with flat microchannel evaporator and non-metal wick. Proc. of the 10th IHPS, Taiwan, nov. 2011. pp 143-146.

7. EP 0727269, Method of producing a surface with alternating ridges and depressions and a tool for carrying out the said method / N.N.Zubkov, A.I.Ovchinnikov B23C 3/00.

8. Майданик Ю.Ф. Контурные тепловые трубы и двухфазные теплопередающие контуры с капиллярной прокачкой : диссертация ... доктора технических наук : 01.04.14. Москва, 1993.