

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В “КОНТУРНЫХ” ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ

В.Н. Афанасьев, А.В. Недайвозов, А.А. Якомаскин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: yak40@gmx.com

Приведены результаты экспериментальных исследований разработанных и созданных в МГТУ им. Н.Э. Баумана моделей контурных тепловых труб. Исследовано влияние различных узлов и их параметров на свойства контурной тепловой трубы: испарителя (пластины с микроканальными поверхностями, полученными методом деформирующего резания с разными формой и размерами), капиллярных структур (фитилей), выполненных как из металлических, так и неметаллических пористых материалов. Показано, что в качестве фитиля контурной тепловой трубы может использоваться и фильтровальная бумага. Приведены различные конфигурации контурной тепловой трубы, предложена плоская контурная тепловая труба с равномерным центральным отводом пара со всей поверхности испарения.

Ключевые слова: контурная тепловая труба, фитиль, испаритель, конденсатор, компенсационная полость.

EXPERIMENTAL STUDY OF PROCESSES IN LOOP HEAT PIPES

V.N. Afanasiev, A.V. Nedaivozov, A.A. Yakomaskin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: yak40@gmx.com

Results of experimental studies of the loop heat pipe models developed and created at the Bauman Moscow State Technical University are presented. The influence of different units and their parameters on properties of a loop heat pipe has been investigated. The equipment under study included the evaporator (plates with microchannel surfaces, obtained by deforming cutting, with different shapes and sizes) and capillary structures (wicks) made of both metallic and nonmetallic porous materials. It is shown that a filter paper can be also used as a wick of the loop heat pipe. Different configurations of loop heat pipes are given. A flat loop heat pipe is proposed that provides the uniform central steam removal from the entire evaporation surface.

Keywords: loop heat pipe, wick, evaporator, condenser, compensating cavity.

Интенсивное развитие космической, авиационной, электронной, компьютерной и других видов техники требует разработки, создания и внедрения высокоэффективных и компактных систем охлаждения. Вместе со стремительным ростом массы выводимых в космос летательных аппаратов растет мощность их энергоустановок и наряду с этим происходит постоянное усовершенствование приборов и оборудования, а это усложняет системы обеспечения тепловых режимов и требует разработки и внедрения новых методов охлаждения и термостабилизации.

К числу таких эффективных и надежных элементов систем обеспечения тепловых режимов относятся тепловые трубы. В 1960-е годы после опубликования работ Г. Гровера и Т. Коттера [1, 2] было введено понятие и дано определение тепловой трубе (ТТ) — это герметичное теплопередающее устройство, работающее по закрытому испарительно-конденсационному циклу, в котором процессы теплообмена и транспорта жидкого теплоносителя происходят в капиллярной структуре [3, 4]. С этого момента резко возрос интерес к ТТ, которые успешно используются в различных системах охлаждения и терморегулирования, расширяя с каждым годом их возможности и сложность решаемых задач. Использование ТТ в энергетике, энергомашиностроении, металлургии, химической технологии, радиоэлектронике, авиационной и особенно ракетно-космической технике обусловлено их основными свойствами: способностью передавать большие тепловые потоки при малых перепадах температур, теплоту при произвольной ориентации в поле действия массовых сил; малыми массой и габаритными размерами теплопередающих систем; удобством и простотой монтажа и обслуживания; отсутствием затрат энергии на перемещение теплоносителя и отсутствием подвижных деталей; возможностью изготовления теплоотводов различной геометрической формы; бесшумностью; долговечностью и надежностью работы.

В тепловой трубе в области подвода теплоты жидкость испаряется, а в области отвода теплоты конденсируется пар, отдавая выделившуюся тепловую энергию. Конденсат возвращается в зону испарения с помощью фитиля (капиллярной структуры), который может работать в любых условиях, в том числе и в невесомости, что очень важно для космической техники.

Обладая комплексом перечисленных свойств, ТТ во многих случаях их практического использования выгодно отличаются от традиционных теплопередающих устройств и позволяют значительно улучшить технико-экономические характеристики систем энергоснабжения и терморегулирования, в том числе в электронной и компьютерной технике. Согласно данным работы [5] число транзисторов в микросхемах с каждым годом стремительно увеличивается и, в первую очередь, в производстве электронных компонентов. Так, в 2001 г. плотность транзисторов в среднем составляла 0,5 млн/мм², а в 2013 г. она стала равняться 6,5 млн/мм² [6], т.е. плотность тепловыделения с каждым годом увеличивается. В стационарных компьютерах, где нет жестких ограничений на размеры и массу охлаждающих устройств, ТТ используются в основном для трансформации теплового потока. В компактных компьютерах и ноутбуках ТТ используются как для

трансформации теплового потока, так и для переноса теплоты из внутренней области, где расположена микросхема, на периферию. В нутбуках, как известно, на размеры ТТ и особенно на их толщину накладываются очень жесткие ограничения.

Наряду с многочисленными преимуществами ТТ имеют ограничения по мощности и расстоянию переноса теплоты, что существенно сужает область их применения. Эти проблемы решены в контурных ТТ, которые были разработаны в 1970-е годы советскими учеными и инженерами [7]. Контурные ТТ являются одним из видов ТТ и обладают всеми их достоинствами. Однако, по сравнению с обычными ТТ, они способны достаточно эффективно передавать теплоту на расстояние до нескольких метров при любой ориентации в гравитационном поле или до нескольких десятков метров в горизонтальном положении или в невесомости [8]. Для пара и жидкости имеются отдельные каналы, представляющие собой гладкостенные трубки малого диаметра без пористого материала внутри, которые можно укладывать, изгибая, как это необходимо в условиях жестких пространственных ограничений.

Первоначально контурные ТТ (КТТ) в силу указанных свойств нашли применение в системах терморегулирования космических аппаратов. С другими сферами применения дело обстоит сложнее. Известны некоторые случаи использования КТТ в области охлаждения силовой электроники, компьютерных компонентов и технологического оборудования [9, 10], но они имели единичный характер. На пути внедрения КТТ в область охлаждения компактных электронных устройств стоит ряд препятствий, таких как существенная толщина испарителя (по сравнению с испарителями классических ТТ) и дороговизна их производства [11].

Несмотря на то, что такие устройства известны уже достаточно давно, интерес к ним продолжает расти, и в настоящее время по данной проблеме уже проведено много десятков как национальных, так и международных конференций, симпозиумов, семинаров и т.п. Причина этого в том, что потенциальные возможности ТТ и КТТ полностью не реализованы и связаны, главным образом, с технологическими ограничениями, отсутствием единого теоретического представления о процессах, происходящих в КТТ, и рядом других причин.

Принцип работы КТТ. Контурная ТТ (рис. 1) представляет собой замкнутую испарительно-конденсационную систему. Тепловая нагрузка подводится к испарителю и расходуется на испарение теплоносителя. Зона испарения образована разветвленной системой пароотводных каналов, обеспечивающих эффективный тепло- и массоотвод из испарителя. Образовавшийся пар по паропроводу направляется в

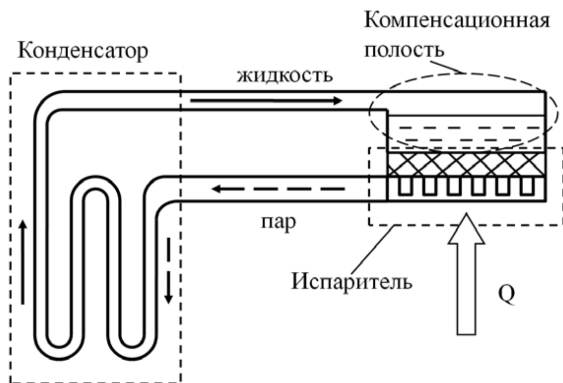


Рис. 1. Схема контурной тепловой трубы

конденсатор, где он конденсируется, и в жидком состоянии по конденсаторопроводу направляется в компенсационную полость, затем с помощью капиллярного насоса подается к фронту парообразования в испарителе.

В контурной ТТ фитиль (капиллярная структура) является не только капиллярным насосом, но и тепло-гидравлическим затвором. Он не позволяет пару попасть в компенсационную полость (КП) через насыщенную жидкостью капиллярную структуру и служит дополнительным термическим сопротивлением между КП и испарителем [12]. К достоинствам КТТ можно отнести: использование мелкодисперсных фитилей для получения большего перепада давлений; максимальное сокращение расстояния движения жидкости в фитиле; максимальное снижение потерь давления на транспортном участке. Снижение потерь давления на транспортном участке КТТ достигается применением для передвижения теплоносителя отдельных гладкостенных трубопроводов малого диаметра, которые исключают как тепловое, так и гидродинамическое взаимодействие между встречными потоками жидкости и пара, что характерно для классических ТТ. Это является очень важным качеством КТТ, которое обеспечило к ним повышенный интерес, в том числе и тем, что делает возможным переохлаждение теплоносителя после его конденсации, тем самым обеспечивая устойчивую работу КТТ на переходных и нестационарных режимах работы.

Зона парообразования КТТ организована системой паропроводных каналов на стыке капиллярной структуры с поверхностью испарителя. В этой области реализуется тепло- и массообмен в структуре с перевернутыми менисками, когда потоки теплоты и жидкости направлены преимущественно навстречу друг другу. При подводе теплоты к испарителю жидкость испаряется, и пар начинает перемещаться по паропроводу в конденсатор, где в результате фазового перехода образовавшаяся жидкость по жидкостному трубопроводу направляется в компенсационную полость, и таким образом контур замыкается.

Конденсатор предназначен для передачи внешнему приемнику отводимой теплоты в процессе фазового перехода и в зависимости от конкретных условий эксплуатации может иметь практически любую форму и конструкцию, в наибольшей степени соответствующую условиям теплообмена [8].

Компенсационная полость служит для накопления избыточной жидкости, постоянной подпитки фитиля теплоносителем и компенсации его температурного расширения.

В последние годы в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре “Теплофизика” проводятся комплексные исследования КТТ [13–15] с использованием различных узлов: фитилей, конденсаторов, компенсационных полостей, поверхностей испарения, в том числе получаемых методом деформирующего резания [16]. Использование микроканальных поверхностей с различной геометрией делает возможным применение в качестве капиллярных структур (фитилей) как металлических (спеченные никелевые, титановые, медные порошки, порошки из коррозионно-стойкой стали), так и неметаллических пористых материалов (стекловолокно, синтетические волокна, фильтровальная бумага и др.)

Миниатюрная КТТ с микроканалами и неметаллическим фитилем. В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработаны и созданы различные конфигурации КТТ, используемые для отработки методики сборки и разборки КТТ, проверки соответствия геометрических размеров и характеристик КТТ, выбранных и полученных в результате расчета. Прозрачная стенка испарителя (рис. 2, *а*) позволяет визуально контролировать процессы, происходящие в компенсационной полости и на

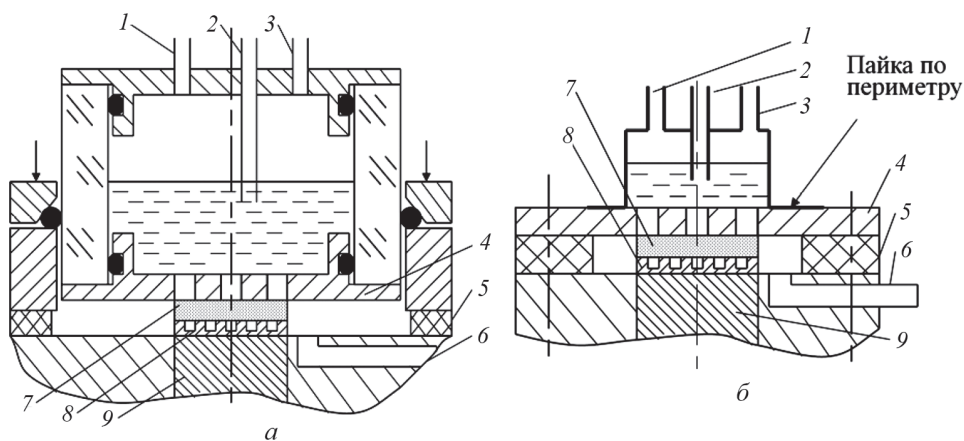


Рис. 2. Конструкция испарителя:

а — с прозрачной КП; *б* — с непрозрачной КП; 1, 2, 3 — трубки к датчику вакуума, возврата жидкости, линии заправки и вакуумирования соответственно; 4 — перфорированная пластина из стекловолокна; 5 — прокладка из вакуумной резины; 6 — выход пара; 7 — фитиль; 8 — микроканальная пластина; 9 — нагреватель

поверхности фитиля, а также вовремя замечать проникновение пузырьков в КП или высыхание фитиля. Процесс сборки и разборки устройства относительно простой, так как в созданной КТТ имелись, в основном, разъемные соединения, что оказалось и существенным недостатком конструкции, поскольку большое число разъемных соединений не позволяло достигнуть достаточного уровня герметичности контура.

В процессах испарения и конденсации наблюдалось натекание воздуха через микротечи в стыках, что приводило к росту рабочей температуры КТТ и давления в КП и, как следствие, ухудшению циркуляции теплоносителя.

Испаритель должен обеспечивать, с одной стороны, непрерывный и равномерный процесс парообразования, что гарантирует высокую интенсивность теплоотвода, а с другой стороны — равномерный и быстрый процесс удаления пара в пароотводные трубопроводы. В испарителях, приведенных на рис. 2, использован один и тот же нагреватель. Разъемным являлось только одно соединение — уплотнение крышки испарителя через вакуумную прокладку 5. Все остальные соединения выполнялись пайкой. Для подвода теплоты к микроканальной пластине 8 был использован омический нагреватель 9, представляющий собой медный стержень переменного сечения. Нижняя его часть имеет круглое поперечное сечение и обмотана изолированной нихромовой проволокой. В верхней части стержень имеет прямоугольное сечение 20×40 мм с неизменными геометрическими параметрами на длине 40 мм, где установлены термопары для определения теплового потока методом плоской пластины. В ходе экспериментов отмечено, что тепловая мощность, измеренная и рассчитанная с помощью данного метода (по показаниям термопар), на 30 % меньше, чем мощность по показаниям ваттметра, т.е. это значение тепловых потерь от нагревателя в окружающую среду.

Одним из ключевых элементов испарителя КТТ является микроканальная пластина, выполняющая двойную функцию: обеспечивает равномерный подвод тепловой энергии к поверхности испарения и отвод пара по микроканалам. В рассматриваемых КТТ использовались микроканальные поверхности различной формы и размеров. Они представляют собой оребренные пластины, получаемые методом деформирующего резания [16]. Пластины имеют прямоугольную форму с высотой ребра 1 мм и шириной 0,4 мм.

Конденсатор представлял собой теплообменный аппарат типа “змеевик”. В качестве охлаждающего агента использовалась проточная вода. Для транспортировки пара и жидкости на участках между испарителем и конденсатором КТТ использовались латунные трубки.

Расстояние между испарителем и конденсатором составляло 400 мм. В ходе экспериментов КТТ располагалась горизонтально (конденсатор и испаритель находились на одном уровне относительно земли). Внутренний диаметр трубок конденсатора для паровой фазы составлял 3,2 мм и для жидкостной — 1,6 мм. Общая длина конденсатора составляла 700 мм.

В экспериментальных исследованиях использовались фитили из фильтровальной бумаги (ГОСТ 12026–76). Средний радиус пор составлял 10 мкм. Из листа фильтровальной бумаги вырезались фрагменты прямоугольной формы с размерами поверхности теплоподвода 20×40 мм. Далее фрагменты укладывались друг на друга до образования необходимой толщины фитиля. Затем набранный фитиль устанавливали на микроканальную пластину 8 (см. рис. 2) и прижимали сверху перфорированной пластиной 4 из стекловолокна. Таким образом, плотно зажатые между двумя элементами КТТ слои фильтровальной бумаги образовывали единое целое.

Порядок подготовки и проведения эксперимента следующий (рис. 3).

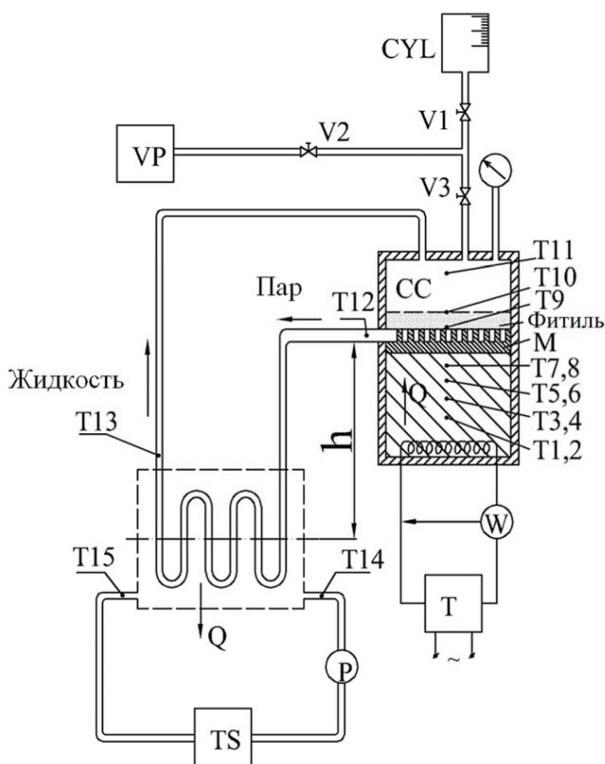


Рис. 3. Схема КТТ:

V1, V2, V3 — вентили; W — ваттметр; Т — трансформатор; P — расходомер; T1–T15 — термопары; VP — вакуумный насос; CYL — заправочный цилиндр; TS — термостат; M — микроканальная пластина

1. Тщательно очистить все элементы КТТ, и особенно внутренние поверхности.
2. Собрать КТТ.
3. Откачать воздух из системы (вакуумирование) с помощью пластинчато-роторного вакуумного насоса 2НВР-5ДМ (на схеме VP) при закрытом клапане V1 и открытых V2 и V3.
4. Проверить КТТ на вакуумную герметичность (методом мыльной пленки и по показаниям датчика вакуума).
5. Откачать воздух из заправочного цилиндра со льдом CYL при закрытом клапане V3 и открытых V2 и V1. (В экспериментах использовался метод заправки с замораживанием теплоносителя.)
6. Расплавить лед, нагревая заправочный цилиндр с внешней стороны.
7. Заправить КТТ строго определенным количеством теплоносителя из заправочного цилиндра CYL при закрытом клапане V2.
8. Перекрыть клапан V3 после того, как весь теплоноситель за счет разности давлений в заправочном цилиндре и рабочем объеме КТТ попадет в компенсационную полость.
9. Подать напряжение на нагреватель и запустить контур охлаждения конденсатора.

Заправлять КТТ необходимо теплоносителем строго определенного объема, что обеспечит устойчивую работу КТТ в любых ситуациях: перегрев, повторный пуск и т.п. [17]. Считается, что запуск КТТ состоялся, если температура изменяется в пределах не более одного градуса в течение 10 мин, а через прозрачную стенку визуально наблюдается поступление жидкости из конденсатора в КП. Типичное время выхода на режим для КТТ данной конструкции составляло от 1 до 3 ч. Столь длительный промежуток времени объясняется массивностью конструкции испарителя и длиной теплопереноса (длиной КТТ). Время выхода на установившийся режим работы пропорционально приложенной тепловой нагрузке. Показания термомпар и датчика вакуума считывались с помощью устройства LCARD LTR 27 и сохранялись на компьютере в виде таблиц.

На данной экспериментальной установке проводились исследования влияния различных фитилей и микроканальных пластин на эффективность работы КТТ. Экспериментально установлено, что в качестве фитиля КТТ могут использоваться не только металлические материалы, но и такие, как фильтровальная бумага.

Ресурсных испытаний не проводилось, но во всех вариантах, в том числе и с фильтровальной бумагой, установки работали длительное время, при этом они многократно выключались и включались. Наиболее полно результаты исследований представлены в работе [14].

Открытая установка для исследования испарителя КТТ. Как правило, при создании КТТ конструкторы сталкиваются с рядом трудностей, связанных со сборкой испарителя, который требует особо точного изготовления деталей и правильного размещения внутренних компонентов. Неточности в сборке могут привести к плохому тепловому контакту между микроканальной теплоподводящей пластиной и фитилем из пористого материала в зоне испарения, что влечет неравномерное распределение тепловой нагрузки. Во время высокотемпературной пайки или сварки возможно частичное или полное окисление структуры фитиля, отрицательно влияющее на его смачиваемость. Погрешности сборки могут также привести к образованию каналов, по которым пар может проникать в КП. К нарушению работы КТТ и снижению ее эффективности приводят натекание воздуха извне после вакуумирования системы и образование осадка на впитывающей поверхности фитиля из-за недостаточной чистоты материалов конструкции и теплоносителя. Кроме того, необходимо убедиться в химической совместимости материалов конструкции и рабочей жидкости, чтобы избежать коррозии и выделения неконденсирующихся газов. При сборке контура КТТ большая часть соединений должна выполняться сваркой или пайкой для увеличения надежности и герметичности, а это вносит дополнительные трудности. Все это имеет большое значение при исследовании влияния различных видов фитилей и микроканальных поверхностей, так как необходимо проводить многократную сборку и разборку конструкции.

С учетом сказанного, была создана упрощенная экспериментальная установка, в которой исследовалась работа только испарителя КТТ (рис. 4 и 5). Установка представляла собой открытую систему, в которой процесс испарения происходил в месте контакта фитиля и ребер микроканальной пластины, а пар выходил непосредственно в окружающую среду. Конструкция выполнена таким образом, чтобы обеспечить возможность быстрой смены исследуемых фитилей и микроканальных пластин, причем фитиль выполнял свои основные функции: равномерно подавал жидкость к поверхности парообразования и обеспечивал гидрозатвор, не пропуская пар в компенсационную полость.

Сборка данного испарителя не представляет большой сложности. Порядок сборки следующий: керамический нагреватель 3 с приклеенной с помощью теплопроводного клея микроканальной пластиной 4 (исследуемый образец) устанавливался на основание 1 из текстолита толщиной 8 мм, которое являлось также теплоизолятором нагревателя с нижней стороны. Микроканальные пластины выполняют двойную функцию — через них подводится тепловая энергия к поверхности парообразования и отводится образующейся пар по микроканалам. Свер-

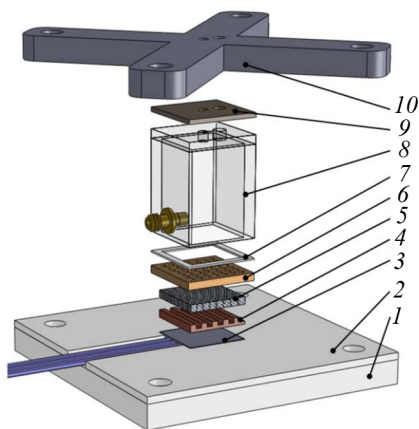


Рис. 4. Сборка испарителя:

1 — основание; 2 — изоляционная пластина; 3 — нагреватель; 4 — микроканальная пластина; 5 — фитиль; 6 — перфорированная пластина; 7 — прокладка из фильтровальной бумаги; 8 — компенсационная полость; 9 — прокладка из вакуумной резины; 10 — крестовина

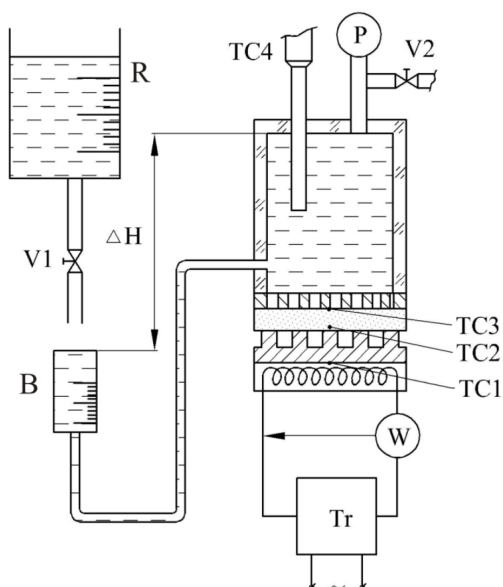


Рис. 5. Схема эксперимента:

V1, V2 — вентили; Tr — Трансформатор; P — датчик вакуума; W — ваттметр; TC1–TC4 — термопары; ΔH — перепад высот; R — резервуар; B — буфер

ху устанавливали фторопластовую пластину 2, выполняющую функцию теплоизолятора нагревателя с боковых сторон. После этого на микроканальную пластину накладывали первый слой многослойного фитиля 5, на который укладывали по центру перпендикулярно направлению микроканалов плоскую термопару толщиной 30 мкм. Затем накладывали остальные слои фитиля, а сверху устанавливали еще одну плоскую термопару, измеряющую температуру на впитывающей стороне фитиля. Перфорированная пластина 6 с отверстиями диаметром 1,5 мм равномерно прижимала фитиль к греющей поверхности.

Отверстия перфорации служили для подпитки фитиля жидкостью. Прокладка 7 изготовлена из четырех слоев фильтровальной бумаги, размер пор бумаги был меньше, чем у фитиля, чтобы пропитанная жидкостью бумажная прокладка при заданном перепаде уровней воды ΔH не пропускала в КП воздух из атмосферы во время работы. Далее устанавливали корпус компенсационной полости 8, выполненный из оргстекла для обеспечения визуализации процесса. Крестообразная деталь 10 через прокладку 9 из вакуумной резины сжимала всю конструкцию четырьмя болтами. В верхней стенке КП были выполнены два отверстия: одно — для установки термопары, второе — для датчика давления и дренажного вентиля (см. рис. 5).

Во время работы жидкость подается из резервуара R через вентиль V1 в буфер подачи жидкости B, который находится ниже, чем

компенсационная полость. В буфере жидкость поддерживается на постоянном уровне, чтобы обеспечить заданный перепад давления. При этом давление в КП контролируется датчиком Р. С помощью буфера В можно также измерять расход жидкости, поддерживая ее на постоянном уровне и замеряя объем жидкости, уходящей в испаритель, по шкале резервуара за определенное время.

Перед запуском необходимо полностью заполнить компенсационную полость жидкостью, создать перепад уровней жидкости между КП и буфером и убедиться в герметичности КП. Для этого буфер устанавливали так, чтобы уровень жидкости в нем был выше, чем уровень дренажного вентиля V2, и заполняли КП водой из резервуара R. В эксперименте использовалась дистиллированная дегазированная вода. После заполнения водой КП она начинала вытекать через дренажный вентиль V2, который перекрывался, и буфер опускался ниже верхнего края жидкости в КП так, чтобы обеспечить заданный перепад высот ΔH . Такая разность уровней позволяла создать необходимое разрежение в КП, регистрируемое датчиком вакуума Р. Разрежение позволяло создать условия в фитиле, близкие к условиям его работы в закрытой КТТ. Фитиль является гидравлическим барьером: на стороне фитиля, обращенной к нагревающей поверхности, создается повышенное давление из-за процесса парообразования в стесненных условиях. На противоположной стороне фитиля, обращенной в компенсационную полость, давление ниже, так как оно соответствует температуре более холодной жидкости, поступающей из конденсатора в КП. Тепловая нагрузка создается плоским керамическим нагревателем WATLOW CE-01-0005 толщиной 2,5 мм и размерами в плане 19×19 мм, который подключен через трансформатор и ваттметр. Мощность изменялась от 20 до 140 Вт с шагом 20 Вт. Термопары типа хромель-копель были установлены, как показано на рис. 5. Термопара ТС4 находилась в компенсационной полости около отверстия входного штуцера и допускала вертикальное перемещение. Плоская термопара ТС3 толщиной 30 мкм находилась непосредственно на впитывающей поверхности фитиля, такая же термопара ТС2 была установлена внутри фитиля. Термопара ТС1 припаяна к микроканальной пластине на стороне, обращенной к нагревателю. Для измерения температуры пара использовалась отдельная термопара ТС5 (на рис. 5 не показана), которая имела возможность перемещаться вдоль выходов пароотводных каналов, обеспечивая измерение температуры пара на различных участках. Данные с термопар и датчика вакуума регистрировались с помощью крейта Lcard LTR27 и передавались на компьютер для графического отображения информации, а также для записи таблиц в файл. В настоящей работе исследовалось влияние на эффективность

работы КТТ разных фитилей и по конструкции и по геометрии микроканальных пластин. Характеристики пористых материалов, из которых они изготавливались, приведены в табл. 1, а параметры микроканальных пластин — в табл. 2.

Таблица 1

Характеристики пористых материалов

Материал	Размер пор, мкм	Толщина, мм
Фильтровальная бумага (FP) ГОСТ 12026–76	10	0,4
Коррозионно-стойкая сталь (SS), спеченный порошок	10–15	2,5
Стекловолокно (GF)	2,6	0,4; 1,2; 2,4

Таблица 2

Параметры микроканальных пластин

Номер	Ширина канала m , мм	Высота канала h , мм	Шаг p , мм	Схема
MC1	0,3	1,0	0,6	
MC2	0,1	0,8	0,2	

В некоторых случаях в КП наблюдалось движение пузырьков от впитывающей поверхности фитиля к верхней части КП. Интенсивность этого движения при одной и той же тепловой нагрузке была у каждого фитиля разной. Наиболее интенсивное движение пузырьков наблюдалось на металлическом фитиле. Менее интенсивное — на фитиле из стекловолокна самой малой толщины (0,4 мм). С увеличением числа слоев неметаллического фитиля интенсивность проникновения пузырьков в КП уменьшалась, и при толщине фитиля 2,4 мм наличие пузырьков не регистрировалось. Часть этих пузырьков очевидно являлась неконденсирующимся газом, проникшим в КП из атмосферы через фитиль. Об этом говорит тот факт, что после остывания всей системы в верхней части КП остался пузырь. Вероятно, пузыри возникают потому, что в некоторых местах фитиля с крупными порами происходит локальное осушение пор из-за неравномерного поступления жидкости к поверхности нагрева, и газ, обнаружив эту слабую зону, проникает в КП.

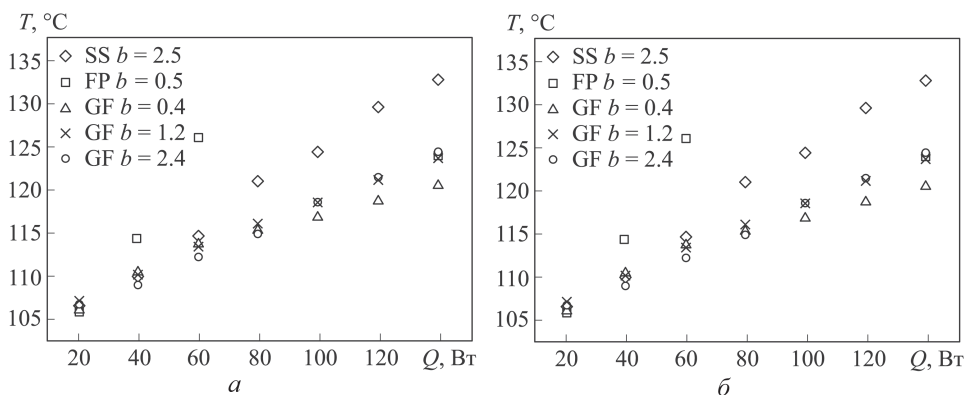


Рис. 6. Температура ТС1 в зависимости от нагрузки для различных фитилей с пластинами МС1 (а) и МС2 (б)

На рис. 6 приведены экспериментально полученные значения температуры поверхности нагревателя в зависимости от тепловой нагрузки для различных микроканальных пластин и материалов фитиля. Видно, что на всех тепловых режимах неметаллические фитили позволяли получить меньшую температуру нагревающей поверхности. Для фильтровальной бумаги были проведены эксперименты только на режимах 20...60 Вт, так как при более высоких тепловых нагрузках установка не выходила на режим. Предположительно, происходило пересыхание фитиля. Таким образом, для каждого типа фитиля, его пористости и проницаемости существует критический тепловой поток, ограничивающий нормальную работу КТТ.

Как и ожидалось, рассмотренные неметаллические фитили даже при малых толщинах обеспечивают большой перепад температур между испарителем и КП, т.е. температура в ней будет ниже. С практической точки зрения это означает, что КТТ с неметаллическим фитилем могут иметь большую дистанцию теплопереноса, или при одном и том же перепаде давления (по сравнению с КТТ с металлическим фитилем) неметаллический фитиль даст возможность работать в области нижних точек кривой насыщения теплоносителя.

На рис. 7 показана кривая изменения температуры пластины ТС1 и температуры впитывающей поверхности фитиля ТС3 в зависимости от времени. Видно, что в фитилях близкой толщины процесс испарения для фитиля из стекловолокна начинается раньше, чем для фитиля из порошка коррозионно-стойкой стали. Это происходит из-за более низкой теплопроводности стекловолокна.

В ходе настоящей работы была создана экспериментальная установка для исследования процессов теплопереноса в испарителе контурной тепловой трубы. Проведена серия экспериментов с использованием фитилей из различных материалов и микроканальных пластин различной конфигурации. Экспериментально установлено, что

микроканальные пластины с шириной каналов 0,3 мм являются более эффективными при высоких тепловых потоках, тогда как пластины с меньшей шириной каналов лучше работают при низких тепловых потоках.

Испаритель с фитилем из стекловолокна различной толщины, размером пор 2,6 мкм работает с более низкой температурой стенки, чем испаритель с металлическим фитилем размером пор 10 мкм из порошка коррозионно-стойкой стали. Данное сравнение не является строгим ввиду различия сразу нескольких характеристик материалов — пористости, проницаемости, теплопроводности, размеров пор и др.

Отметим, что неметаллические фитили позволяют создавать значительный перепад температур между впитывающей и подогреваемой поверхностями фитиля во всем диапазоне тепловых нагрузок.

Более подробные результаты приведены в работе [15].

Плоская КТТ с центральным пароотводом. Среди недостатков КТТ [12] можно отметить неравномерность подвода теплоносителя (жидкости) к поверхности испарения и неравномерность отвода пара от нее, поэтому в МГТУ им. Н.Э. Баумана была создана плоская КТТ с центральным пароотводом (рис. 8), позволяющая исследовать влияние различных конструктивных и геометрических параметров КТТ (испарителя, фитиля, компенсационной полости и конденсатора, а также их взаимного расположения в гравитационном поле) на эффективность работы КТТ. Контурная тепловая труба названа плоской по поверхности теплоподвода.

Контурная тепловая труба состоит из испарителя 1, фитиля 2, конденсатора 6 и компенсационной

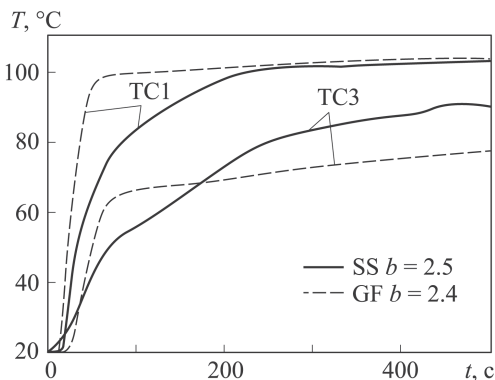


Рис. 7. Процесс запуска для пластины TC1 при тепловой нагрузке $Q = 20$ Вт

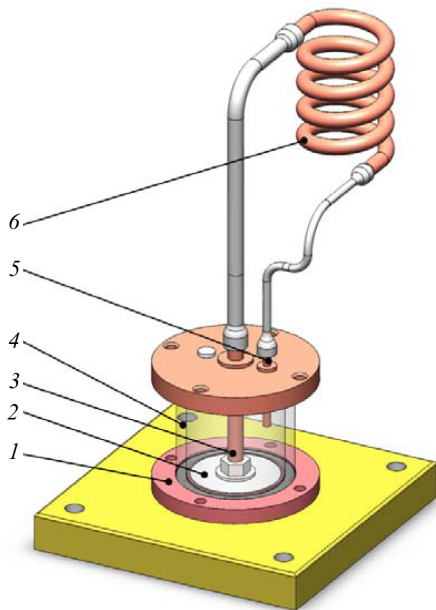


Рис. 8. Контурная тепловая труба с центральным отводом пара

полости 4, которые соединены между собой трубопроводами – паропроводом 3 и конденсаторопроводом 5, т.е. пар и конденсат не контактируют между собой.

Испаритель 1 представляет собой плоскую поверхность с припаянными на нее ребрами, пространство между которыми служит паротводными каналами. На испаритель устанавливается фитиль 2 (пористая капиллярная структура), который выполняет следующие функции: непрерывно и равномерно подпитывает жидкостью зоны испарения; обеспечивает гидравлический барьер для пара, т.е. предотвращает попадание пара в КП, и “тепловой затвор”, т.е. исключает большие тепловые потоки из зоны испарения в компенсационную полость.

К испарителю примыкает компенсационная полость 4, стенки которой выполнены из оптического стекла, что позволяет визуализировать процессы, протекающие в испарителе, фитиле и в КП. Конструктивное совмещение испарителя с КП в одном корпусе позволяет обеспечить равномерную и непрерывную смачиваемость фитиля жидкостью и регулировать изменение объема жидкости в КТТ при различных тепловых потоках. Следует отметить, что при таком размещении испаритель–фитиль–КП желательнее использовать фитили с низкой теплопроводностью (из стекловолокна, синтетических волокон, фильтровальной бумаги и т.п.), что значительно уменьшит потери теплоты в КП и снизит рабочую температуру КТТ.

Выводы. 1. Были разработаны и созданы различные конфигурации КТТ.

2. Экспериментально установлено, что в качестве фитиля КТТ могут использоваться не только металлические материалы, но и неметаллические пористые материалы (стекловолокно, синтетические волокна, фильтровальная бумага и др.); неметаллические фитили даже при малых толщинах обеспечивают больший перепад температур между испарителем и КП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Grover G.M., Gotter T.P., Erickson G.F. Structures of very high conductance // 35 Journal of Applied Physics. 1964. Vol. 35. P. 1990–1991.
2. Cotter T.P. Theory of Heat Pipes. Report LA-3246-MS. Los Alamos Sci. Lab., Los Alamos N.M. (February, 1965).
3. Елисеев Б.В., Сергеев Д.И. Что такое тепловая труба? М.: Энергия, 1971. 136 с.
4. Дан П.Д., Рей Д.А. Тепловые трубы / пер. с англ. Ю.А. Зейгарника. М.: Энергия, 1979. 272 с.
5. Moore G.E. Cramming More Components onto Integrated Circuits // Electronics. 1965. Vol. 38. No. 8. P. 114–117.
6. Intel Product Information (Intel Corporation). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/corporate-information/museum-transistors-to-transformations-brochure.pdf>. (Дата обращения: 28.12.2013).

7. Низкотемпературные тепловые трубы с раздельными каналами для пара и жидкости / Ю.Ф. Герасимов, Ю.Ф. Майданик, Г.Т. Щеголев и др. // ИФЖ. 1975. № 6. Т. 28. С. 957–960.
8. Майданик Ю.Ф. Достижения и перспективы развития контурных тепловых труб: Труды 4-й конф. по тепломассообмену. М.: МЭИ, 2006. С. 84–92.
9. Майданик Ю.Ф. Контурные тепловые трубы — высокоэффективные теплопередающие устройства // Инновации. 2003. № 5 (62). С. 83–86.
10. Pastukhov V.G., Maydanik Y.F. Low-noise cooling system for PC on the base of loop heat pipes // Applied Thermal Engineering. 2007. Vol. 27. P. 894–901.
11. Singh R., Akbarzadeh A., Mochizuki M. Thermal Potential of Flat Evaporator Miniature Loop Heat Pipes for Notebook Cooling // IEEE Transactions on components and packaging technologies. Vol. 33, 2010. P. 32–45.
12. Кисеев В.М. Тепломассоперенос и фазовые превращения в мелкопористых капиллярных структурах: Дис. . . д-ра физ.-мат. наук. 01.04.14. Екатеринбург, 2001. 332 с.
13. Морской Д.Н., Якомаскин А.А. Режимы работы контурной тепловой трубы с микроканалами при низких тепловых потоках // Студенческий научный вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана: Сб. тез. докладов общеуниверситетской НТК “Студенческая научная весна–2011”. Т. 11. Ч. 3. С. 198–199.
14. Yakomaskin A.A., Morskoy D.N., Afanasiev V.N. Feasibility study of loop heat pipes with flat microchannel evaporator and non-metal wick / Proc. of the 10th IHPS, Taiwan, nov. 2011. P. 143–146.
15. Yakomaskin A.A., Afanasiev V.N., Zubkov N.N., Morskoy D.N. Investigation of heat transfer in evaporator of microchannel loop heat pipe // Proc. of ASME. 2012 Summer. Heat Transfer Conf. P. 539–546.
16. Зубков Н.Н., Овчинников А.И., Кононов О.В. Изготовление теплообменных поверхностей нового класса деформирующим резанием // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. № 4. 1993. С. 79–82.
17. Вершинин С.В., Майданик Ю.Ф., Ферутатер Ю.Г. Влияние количества теплоносителя на работу “антигравитационной” тепловой трубы // Теплофизика ядерных энергетических установок. Межвуз. сб. науч. трудов. Свердловск, 1984. С. 154–163.
18. Майданик Ю.Ф. Контурные тепловые трубы и двухфазные теплопередающие контуры с капиллярной прокачкой: Дис. . . д-ра техн. наук. 01.04.14. М., 1993. 47 с.

REFERENCES

- [1] Grover G.M., Gotter T.P., Erickson G.F. Structures of very high conductance. *J. Appl. Physics*, 1964, vol. 35, pp. 1990–1991.
- [2] Cotter T.P. Theory of Heat Pipes. *Report LA-3246-MS*. Los Alamos Sci. Lab., Los Alamos N.M. 1965.
- [3] Eliseev B.V., Sergeev D.I. Chto takoe teplovaya truba? [What is a heat pipe?]. Moscow, Energiya Publ., 1971. 136 p.
- [4] Dunn P.D., Reay D.A. Heat Pipes. Pergamon Press, 1976. (Russ. ed.: Dan P.D., Rey D.A. *Teplovye truby*. Moscow, Energiya Publ., 1979. 272 p.).
- [5] Moore G.E. Cramming More Components onto Integrated Circuits. *Electronics*. 1965, vol. 38, no. 8, pp. 114–117.
- [6] Intel Product Information (Intel Corporation). [Электронный ресурс]. URL: Available at: <http://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/corporate-information/museum-transistors-to-transformations-brochure.pdf>. (accessed: 28.12.2013).

- [7] Gerasimov Yu.F., Maydanik Yu.F., Shchegolev G.T., Filippov G.A., Starikov L.G., Kiseev V.M., Dolgirev Yu.E. Low-temperature heat pipes with separate channels for the liquid and vapor. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], 1975, vol. 28, no. 6, pp. 957-960 (in Russ.).
- [8] Maydanik Yu.F. Achievements and prospects of development of loop heat pipes. *Tr. 4-y konf. po teplomassoobmenu* [Proc. 4th Conf. on the Heat and Mass Transfer], 2006, Moscow, MEI Publ., pp. 82-92 (in Russ.).
- [9] Maydanik Yu.F. Loop heat pipes - high efficiency heat-transfer apparatus. *Innovatsii* [Innovations], 2003, vol. 62, no. 5, pp. 83-86 (in Russ.).
- [10] Pastukhov V.G., Maydanik Y.F. Low-noise cooling system for PC on the base of loop heat pipes. *Appl. Thermal Engineering*, 2007, vol. 27, pp. 894-901.
- [11] Singh R., Akbarzadeh A., Mochizuki M. Thermal potential of flat evaporator miniature loop heat pipes for notebook cooling. *IEEE Transactions on components and packaging technologies*, 2010, vol. 33, pp. 32-45.
- [12] Kiseev V.M. Teplomassoperenos i fazovye prevrashcheniya v melkoporistykh kapillyarnykh strukturakh. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk: 01.04.14. [Heat and mass transfer and phase transformations in small-pore capillary structures. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Ekaterinburg, 2001. 332 p.
- [13] Morskoy D.N., Yakomaskin A.A. Modes loop heat pipes with microchannels at low heat fluxes. *Stud. Nauchn. Vestn. MGTU im. N.E. Baumana: Sb. tez. dokladov obshcheuniversitetskoy NTK "Stud. nauchnaya vesna-2011"* [Stud. Scientific herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ.], 2011, vol. 11, part 3, pp. 198-199 (in Russ.).
- [14] Yakomaskin A.A., Morskoy D.N., Afanasiev V.N. Feasibility study of loop heat pipes with flat microchannel evaporator and non-metal wick. *Proc. of the 10th IHPS*, Taiwan, 2011, pp. 143-146.
- [15] Yakomaskin A.A., Afanasiev V.N., Zubkov N.N., Morskoy D.N. Investigation of heat transfer in evaporator of microchannel loop heat pipe. *Proc. of ASME, 2012 Summer, Heat Transfer Conf.*, 2012, Pap. no. HT2012-58503, pp. 539-546. DOI:10.1115/HT2012-58503
- [16] Zubkov N.N., Ovchinnikov A.I., Kononov O.V. Manufacturing heat-exchange surface of new class by deforming cutting. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 1993, no. 4, pp. 79-82 (in Russ.).
- [17] Vershinin S.V., Maydanik Yu.F., Fershtater Yu.G. *Teplofizika yadernykh energeticheskikh ustanovok. Mezhevz. sb. nauch. trudov.* [Collect. Sc. Pap. "Thermophysics of nuclear power installations" of universities], Sverdlovsk, 1984, pp. 154-163.
- [18] Maydanik Yu.F. Konturnye teplovye truby i dvukhfaznye teploperedayushchie kontury s kapillyarnoy prokachkoy. Diss. dokt. tekhn. nauk.: 01.04.14. [Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, 1993. 47 p.

Статья поступила в редакцию 25.06.2013

Валерий Никанорович Афанасьев — д-р техн. наук, профессор кафедры "Теплофизика" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 125 научных работ в области гидрогазодинамики, тепломассообмена, компактных теплообменных аппаратов, монодисперсных сред и контурных тепловых труб.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

V. N. Afanasiev (b. 1938) — Dr. Sci. (Eng.), professor of "Thermal Physics" department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 125 publications in the field of heat-mass transfer, hydro-gasdynamics, compact heat exchanger, loop heat pipers and monodisperse media.
Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Алексей Викторович Недайвозов — аспирант кафедры “Теплофизика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор трех научных работ в области гидродинамики, тепло-массообмена и контурных тепловых труб.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

A.V. Nedaivozov — post-graduate of “Thermal Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 3 publications in the field of heat and mass transfer, hydrodynamics and loop heat pipes.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Александр Алексеевич Якомаскин — научный сотрудник кафедры “Теплофизика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 14 научных работ в области гидродинамики, тепло-массообмена, кипения и контурных тепловых труб.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

A.A. Yakomaskin — researcher associate of “Thermal Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 14 publications in the field of heat and mass transfer, hydrodynamics, boiling and loop heat pipes.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.