

Технология и технологические машины

УДК 536.248.2

Диагностика температурного поля контурной тепловой трубы с открытой компенсационной полостью

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

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Diagnostics of the temperature field of a loop heat pipe with an open compensation cavity

V.N. Afanas'ev, A.V. Nedayvozov, A.A. Yakomaskin

Bauman Moscow State Technical University, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation.



e-mail: alex-gaz-master@ya.ru, a.nedaivozov@ya.ru



Тепловые трубы (ТТ) широко используются в различных видах техники, однако появляющиеся новые технологии выдвигают требования, которым они не могут соответствовать. Например, одним из ограничений применения ТТ является их повышенная чувствительность к изменению положения в поле силы тяжести, так, небольшое превышение зоны испарения над зоной конденсации приводит к резкому снижению эффективности ТТ. Кроме того, ТТ имеют ограничения по величине передаваемых мощностей, расстоянию переноса теплоты, что существенно сужает область их применения. Все это предопределило появление контурных тепловых труб (КТТ), которые имеют все основные достоинства ТТ и при этом лишены их недостатков. Представлена разработанная, созданная и экспериментально исследованная в МГТУ им. Н.Э. Баумана модель плоской КТТ с открытой компенсационной полостью. Испаритель данной КТТ представляет собой латунную пластину с припаянными к ней ребрами и фитилем, установленным на пластину. В качестве материала фитиля использовался порошок марки ПНС 10. В ходе экспериментальных исследований было получено поле температур в плоской КТТ с открытой компенсационной полостью, что позволило оценить тепловое состояние теплоносителя в контуре.

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



Heat pipes (HPs) that are widely used in various types of equipment often cannot meet the demands of new technologies. For example, they are very sensitive to their position in the gravitational field because a slight excess of the size of the evaporation zone over that of the condensation zone can drastically reduce their efficiency. Moreover, they have limited transmission capacity and heat transfer distance, which significantly reduces the field of their application. Unlike HPs, loop heat pipes (LHPs) are not subject to these drawbacks but have all major advantages of HPs. A plane LHP model with an open compensation cavity that was developed, designed and experimentally investigated at Bauman Moscow State

Technical University is presented. The LHP evaporator is a brass plate with welded ribs and a wick mounted on the plate. The wick material is powder PNS-10. Experimental studies were performed to find the temperature field in a plane LHP with an open compensation cavity, which made it possible to estimate the thermal state of the heat-carrying medium in the loop.

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

Разработка, создание и внедрение высокоэффективных, компактных и надежных систем охлаждения и термостабилизации — одна из главных задач теплоэнергетики. К числу таких эффективных и надежных систем обеспечения тепловых режимов относятся тепловые трубы (ТТ), которые, появившись в 60-х годах XX века, быстро завоевали признание и интерес исследователей. Тепловые трубы успешно применяются в различных системах охлаждения и терморегулирования, расширяя с каждым годом их возможности и сложность решаемых задач [1]. Использование ТТ в энергетике, энергомашиностроении, металлургии, химической технологии, в радиоэлектронике, авиационной и особенно в ракетно-космической, а в последнее 10-летие в электронной и компьютерной технике обусловлено их основными свойствами: передача больших тепловых потоков при малых перепадах температур; способность передавать теплоту при произвольной ориентации в поле действия массовых сил; существенное уменьшение массы и габаритов теплопередающих систем; удобство и простота монтажа и обслуживания; отсутствие затрат энергии на перемещение теплоносителя и отсутствие подвижных деталей; возможность изготовления теплоотводов различной геометрической формы; бесшумность; долговечность и надежность работы.

Количество теплоты, которое может быть перенесено потоком при наличии в нем фазовых переходов 1-го рода, как известно, на несколько порядков выше чем то, которое может быть перенесено в виде полного теплосодержания однофазного потока рабочей жидкости в данном интервале температур. Поэтому ТТ, в том числе и контурные ТТ (КТТ), могут передавать большие количества теплоты при малых геометрических размерах по сравнению с традиционными теплопередающими устройствами.

Тепловая труба — герметичное теплопередающее устройство, работающее по закрытому испарительно-конденсационному циклу, в котором процессы теплообмена и транспорта жидкого теплоносителя происходят в капиллярной структуре.

Тепловые трубы успешно используются в различных видах техники, однако появляющиеся новые технологии выдвигают требования, которым они не соответствуют. Например, одним из ограничений ТТ является их повышенная чувствительность к изменению положения в поле силы тяжести: небольшое превышение зоны испарения над зоной конденсации приводит к резкому снижению эффективности ТТ. Кроме того, ТТ имеют ограничения по величине передаваемых мощностей, расстоянию переноса теплоты, что существенно сужает область их применения. Все это предопределило появление КТТ, которые обладают всеми основными достоинствами ТТ, и при этом свободны от их недостатков. Впервые КТТ разработана и внедрена в 70-х годах XX века в СССР.

Контурные тепловые трубы — один из видов ТТ, которые обладают всеми их достоинствами. Однако, по сравнению с обычными ТТ КТТ способны достаточно эффективно передавать значительно большие тепловые потоки на расстоянии до нескольких метров при любой ориентации в гравитационном поле или до нескольких десятков метров в горизонтальном положении в невесомости [2], что и послужило причиной их появления, а затем интенсивного развития. Первоначально КТТ использовались в системах терморегулирования космических аппаратов [2]. Наличие отдельных каналов для пара и жидкости, которые представляют собой гладкостенные трубки малого диаметра, обеспечивает снижение потерь давления на транспортных участках переноса теплоносителя, а отсутствие пористого материала внутри трубопроводов позволяет укладывать их, изгибая, как это необходимо в условиях жестких пространственных ограничений. В настоящее время известно использование КТТ для охлаждения силовой электроники, компьютерных компонентов и технологического оборудования [2–4]. Однако на пути внедрения КТТ в системы охлаждения компактных электронных устройств имеется ряд препятствий, таких как существенная толщина испарителя, сложность технологии их производства и некоторые проблемы, связанные со стабильностью их работы [5].

Несмотря на то, что КТТ известны давно, интерес к ним продолжает расти, и к настоящему времени проведено множество национальных и международных конференций, симпозиумов, семинаров и других мероприятий по данной проблеме. Причина в том, что потенциальные возможности КТТ полностью не реализованы и связано это, главным образом, с технологическими ограничениями, отсутствием единого теоретического представления о процессах, происходящих в КТТ и др.

В настоящее время в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Теплофизика» проводятся комплексные исследования КТТ [6, 7] с использованием различных узлов: капиллярных структур (фитилей), конденсаторов, компенсационных полостей, поверхностей испарения.

Цель работы — исследование температурного поля КТТ с открытой компенсационной полостью (КП).

Контурная тепловая труба (рис. 1) — замкнутая испарительно-конденсационная система, имеющая различные конфигурации в зависимости от поставленных задач. Основными элементами КТТ являются: герметичный корпус, испаритель, капиллярная структура, конденсатор и КП.

Характеристики КТТ зависят не только от конструкции, формы, размеров, материала, но также и от типа теплоносителя и условий, в которых они работают.

Основным конструкционным материалом для изготовления элементов *корпуса* КТТ является коррозионностойкая сталь, которая хорошо поддается различным видам вакуумно-герметичной сварки и обладает достаточно высокой прочностью. Реже используются более теплопроводные, но значительно менее прочные алюминиевые сплавы. Перспективным материалом для КТТ является медь.

Испаритель — узел, непосредственно контактирующий с поверхностью источника тепловыделения и отводящий от него теплоту, ко-

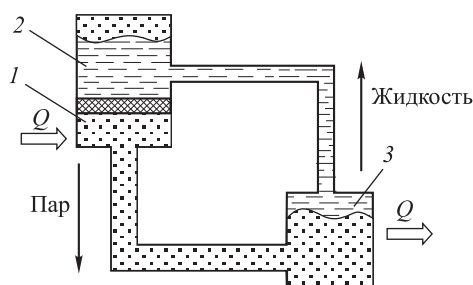


Рис. 1. Схема КТТ:

1 — испаритель; 2 — компенсационная полость;
3 — конденсатор

торая расходуется на испарение жидкого теплоносителя. Зона испарения образована разветвленной системой пароотводных каналов, обеспечивающих эффективный тепло- и массоотвод из испарителя. Образовавшийся пар под действием возникающей разности давлений по паропроводу направляется в конденсатор, где в результате конденсации происходит передача скрытой теплоты парообразования приемнику теплоты — окружающей среде. Жидкий теплоноситель по конденсаторопроводу направляется в КП. В процессе парообразования поверхность раздела фаз жидкость–пар сдвигается внутрь поверхности фитиля, что вызывает возникновение здесь капиллярного давления, которое заставляет жидкость из КП возвращаться в испаритель для последующего испарения. Таким образом, в КТТ непрерывно осуществляется перенос скрытой теплоты парообразования от испарителя к конденсатору при постоянно смоченном фитиле. В работах [6, 7] в составе испарителя использовались микроканальные пластины, выполняющие двойную функцию: равномерный подвод тепловой энергии к поверхности испарения и отвод пара по микроканалам.

Наиболее сложным в конструктивном плане элементом ТТ и КТТ является *капиллярная структура* (КС). В современных ТТ, как правило, в качестве КС используются фитили, изготовленные в виде войлока, порошков и сеток, а также выполненные в виде каналов и канавок различной формы. Капиллярные структуры из металлической проволоки или порошков изготавливаются методом спекания в вакуумных печах при высоких температурах.

В испарителях с микроканальными поверхностями в качестве КС возможно использование как металлических (спеченные никелевые, титановые, медные порошки, порошки из коррозионностойкой стали), так и неметаллических пористых материалов (стекловолокно, синтетические волокна, фильтровальная бумага и др.).

В контурной ТТ фитиль является не только капиллярным насосом, но и тепло-гидравлическим затвором, препятствующим поступлению пара в КП через насыщенную жидкостью КС, и служит дополнительным термическим сопротивлением между КП и испарителем. 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. Перемещение жидкости в КС КТТ, как правило, ограничено несколькими миллиметрами и достигается за счет конструкции фитиля, протяженность которого соответствует размерам зоны испарения и не зависит от общей длины устройства.

Конструктивное совмещение в КТТ в одном корпусе КП и испарителя обеспечивает постоянную смачиваемость фитиля жидкостью и регулирует изменение объема жидкости в КТТ при различных тепловых потоках, но при этом приводит к значительным потерям теплоты в КП через насыщенную жидкостью пористую структуру. Одним из способов уменьшения утечек теплоты является использование в качестве фитилей материалов с низкой теплопроводностью — неметаллов (керамика, пластик, бумага). Для неметаллических фитилей характерны, с одной стороны, низкий коэффициент теплопроводности, малая масса, высокая технологичность, низкая стоимость, простота сборки, а, с другой стороны, некоторые из них имеют ограничение по температуре, недолговечны и дают со временем усадку [6, 7].

Конденсатор предназначен для передачи отводимой теплоты в процессе фазового перехода пар-жидкость внешнему приемнику и в зависимости от конкретных условий эксплуатации может иметь практически любую форму и конструкцию, в наибольшей степени соответствующую условиям теплообмена. Конструкция и размеры зоны конденсации в КТТ могут быть весьма разнообразны, что позволяет легко адаптировать ее к различным условиям теплообмена с внешним стоком теплоты.

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

Как и в классических ТТ особую важность в КТТ имеет выбор *теплоносителя* — жидкости, находящейся внутри корпуса КТТ. Основным критерием при этом являются: теплофизические свойства теплоносителя, влияющие на теплотранспортные характеристики устройства; температурный рабочий диапазон; инертность при взаимодействии с материалом корпуса и КС; уровень передаваемой тепловой мощности КТТ; предельно достижимое капиллярное давление. Каждый теплоноситель эффективен только в каждом конкретном случае. Например, в диапазоне температур до 100 °С, характерном для компьютерной техники, может использоваться широкий ряд теплоносителей

— дистиллированная вода, спирты, фреоны, аммиак, эфир. Заправку КТТ необходимо производить строго определенным количеством теплоносителя, что обеспечит ее устойчивую работу в любых условиях: перегрев, повторный пуск и т.п. Если ТТ заполнена достаточным количеством теплоносителя, то перенос теплоты осуществляется при незначительном тепловом напоре, который определяется температурными уровнями источника и стока теплоты.

На характеристики КТТ огромное влияние оказывают как теплофизические свойства теплоносителя (значения коэффициента поверхностного натяжения и скрытой теплоты парообразования), так и процессы, имеющие место в КТТ (кипение, конденсация, динамика запуска, совместимость материала КТТ и теплоносителя) — все это предъявляет различные требования к расчету и конструкции КТТ.

Важным условием работы ТТ является циркуляция теплоносителя. При максимально возможной интенсивности циркуляции достигается максимальная теплопередающая эффективность КТТ. Ограничения рабочих параметров (переносимой мощности) в КТТ обусловлены перекачивающей способностью КС, основным параметром которой является капиллярное давление, Па:

$$\Delta P = 2\sigma \cos \theta / r,$$

где σ — поверхностное натяжение теплоносителя, Н·м; θ — краевой угол смачивания; r — эффективный радиус пор фитиля, м.

Следовательно, для увеличения капиллярного давления необходимо использовать мелкопористые фитили, что, как правило, учитывается при разработке КТТ [8]. Кроме того, использование теплоносителя с более высоким поверхностным натяжением обеспечит увеличение значения капиллярного давления. Однако рост поверхностного натяжения повышает скрытую теплоту фазового перехода, т. е. соответственно увеличивает тепловую мощность КТТ. Большое влияние на эффективность работы КТТ оказывают также условия контакта ее с внешними источником и стоком теплоты. Теоретический анализ различных аспектов функционирования КТТ детально представлен в работе [8].

Одной из первых разработанных и созданных в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Теплофизика» КТТ была миниатюрная КТТ с микроканалами и неметаллическим фитилем [6]. Она использовалась для отработки методики

сборки, проверки соответствия геометрических размеров и характеристик КТТ, выбранных и полученных в результате расчета. Экспериментальная установка имела два варианта сменных узлов испарителя с КП. Первый (с прозрачной стенкой компенсационной полости) позволял визуально контролировать процессы, происходящие в КП и на поверхности фитиля, а также одновременно замечать проникновение пузырьков в КП или высыхание фитиля. Процесс сборки и разборки устройства относительно простой, так как КТТ содержала разъемные соединения, что оказалось и существенным недостатком конструкции, поскольку наличие большого числа разъемных соединений затрудняло получение необходимой герметичности контура.

Во втором варианте разъемным было только одно соединение — уплотнение крышки испарителя через вакуумную прокладку. Все остальные соединения выполнялись пайкой.

В рассматриваемой КТТ в качестве испарителя использовались микроканальные поверхности разной формы и размеров, выполненные из различных материалов методом деформирующего резания [9, 10]. Конденсатором являлся теплообменный аппарат типа «змеевик», а охлаждающим агентом — проточная вода.

На установке исследовалось влияние различных капиллярных структур и микроканальных пластин на эффективность работы КТТ. Экспериментально установлено, что в качестве фитиля КТТ могут использоваться не только металлические материалы, но и фильтровальная бумага. Наиболее полно результаты исследований представлены в работе [6].

Как правило, при создании КТТ конструкции 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 теплоподводящей поверхностью и фитилем из пористого материала в зоне испарения и, как следствие, к неравномерному распределению тепловой нагрузки. Кроме того, при сборке корпуса КТТ большая часть соединений для увеличения надежности и герметичности выполняется сваркой или пайкой, а это создает дополнительные трудности при экспериментальном исследовании работы КТТ, так как необходимо производить многократную сборку и разборку конструкции. Поэтому была создана упрощенная экспериментальная установка, в которой

исследовалась работа только испарителя КТТ [7]. 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. Такая конструкция обеспечивала 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 КП. В эксперименте в качестве теплоносителя использовалась дистиллированная дегазированная вода. 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.

Исследовано влияние на эффективность работы КТТ материала фитиля и различных по геометрии микроканальных пластин. Исследования показали, что неметаллические фитили даже при малых толщинах позволяют создавать значительно больший перепад температур между испарителем и КП, т. е. температура в КТТ будет ниже. Более подробно результаты представлены в работе [7].

Среди недостатков КТТ часто отмечается неравномерность подвода теплоносителя к поверхности испарения и неравномерность отвода пара от нее [8], поэтому в МГТУ им. Н.Э. Баумана создана плоская КТТ с центральным пароотводом (рис. 2, а), позволяющая исследовать влияние различных конструктивных и геометрических параметров на эффективность работы КТТ: испарителя, фитиля, КП и конденсатора, их взаимного расположения в гравитационном поле и др.

КТТ состоит из испарителя, конденсатора 6 и КП 4, которые соединены между собой трубопроводами — паропроводом 3 и конденсаторопроводом 5, т. е. пар и конденсат не контактируют между собой и следовательно выполняется главное конструктивное отличие ТТ и КТТ.

Испаритель включает в себя латунную пластину 1 диаметром $d = 80$ мм и толщиной $h = 10$ мм с припаянными к ней ребрами, пространство между которыми служит пароотводными каналами, и фитиль 2 толщиной 2,5 мм, устанавливаемый на пластину. Фитиль — спеченный порошок марки ПНС-10, который выполняет следующие функции: непрерывная и равномерная подпитка жидкостью зоны испаре-

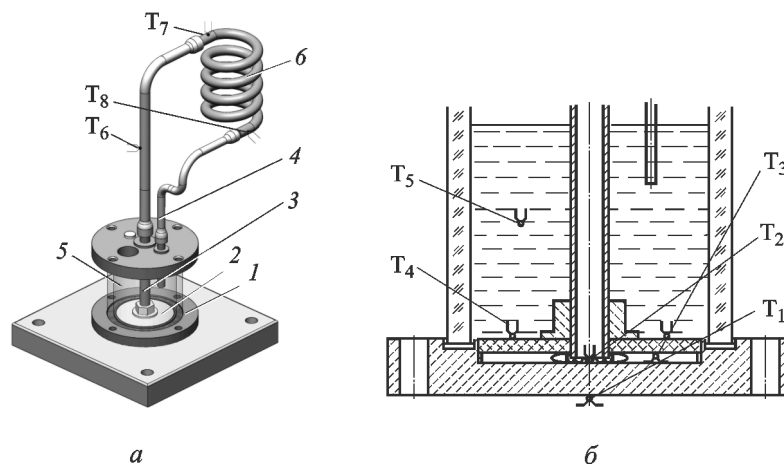


Рис. 2. Схема открытой КТТ с центральным отводом пара (а) и установки термопар (б)

ния; обеспечение гидравлического барьера для пара, т. е. предотвращение попадания пара в КП; обеспечение «теплового затвора», т. е. исключение больших тепловых потоков из зоны испарения в КП.

К испарителю примыкает КП 4, стенки которой выполнены из оптического стекла, что позволяет визуализировать процессы, протекающие в испарителе и в КП. Конструктивное совмещение испарителя и КП в одном корпусе позволяет обеспечивать равномерную и непрерывную подачу жидкости и регулировать изменение объема жидкости в КТТ при различных тепловых потоках.

Центральная паропроводящая трубка диаметром 10 мм, выполненная из стали, обеспечивает равномерный и быстрый отвод пара, не допуская запора канала по расходу. Для уменьшения потерь теплоты трубка должна выполняться из материала с низким коэффициентом теплопроводности. В данном случае для уменьшения потерь теплоты трубка покрыта слоем хлорвинилового изоляционного материала.

Компенсационная полость соединяется с атмосферой через открытую верхнюю часть. Этим данная экспериментальная установка принципиально отличается от нормальной герметичной КТТ, однако это позволило существенно упростить сборку и разборку установки. Авторы исследования считают, что такое упрощение допустимо при исследовании процессов в конденсаторе и в некоторых случаях КП и испарителе.

Тепловая нагрузка создается плоским нагревателем, который подключается к сети через ваттметр и лабораторный трансформатор, что позволяло измерять подводимую к испарителю мощность и плавно изменять ее от 20 до 150 Вт.

Схема КТТ и установки термопар приведена на рис. 2. Точки, в которых измерялись соответствующие температуры: T_1 и T_2 — на внешней и внутренней поверхностях теплоподводящей пластины (поверхности нагрева и испарения); T_3 и T_4 — на нижней и верхней поверхностях фитиля; T_5 — в КП; T_6 — температура пара на выходе из испарителя; T_7 и T_8 — на входе и выходе из конденсатора. Данные с термопар считывались при помощи крейта Lcard LTR27 и передавались на компьютер. Использовались хромель-копелевые термопары толщиной 0,2 мм. Термопары T_2 и T_3 выводились наружу через центральный паропровод 3.

Осциллограмма эксперимента, на которой показаны значения соответствующих термопар от момента запуска КТТ до завершения эксперимента, представлена на рис. 3, а. Исследования проводились при тепловой нагрузке 80 Вт, подводимой к поверхности нагрева. На осциллограмме отчетливо видно время и порядок выхода на режим каждого отдельного участка и установки в целом. Нетрудно заметить, что примерно через 11...13 мин испаритель вышел на установившийся режим, так как показания соответствующих термопар приняли постоянные значения $T_1 = 104$ °С и $T_2 = 100$ °С. Далее практически одновременно с поверхностью нагрева (испарителем) на установившийся режим выходит и нижняя поверхность фитиля, причем $T_2 = T_3 = 100$ °С, что соответствует температуре насыщения воды при атмосферном давлении, так как в двухфазной однокомпонентной системе каждому значению давления насыщения соответствует определенное значение температуры (кипения). Это указывает на то, что в испарителе (пространстве между поверхностью испарения и нижней поверхностью

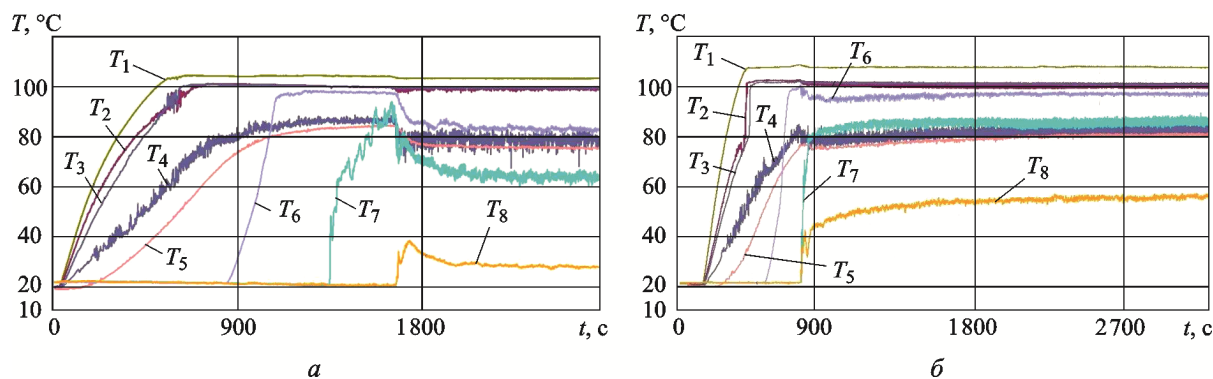


Рис. 3. Осциллограмма изменения температур в открытой КТТ:
 а — при тепловой нагрузке 80 Вт; б — при тепловой нагрузке 120 Вт
 (Полноцветную версию см. <http://www.izvuzmash.bmstu.ru>)

фитиля, в том числе и на ребрах, температура постоянная) идет процесс парообразования. Примерно через 17...18 мин после начала эксперимента температура пара на выходе из испарителя принимает постоянное значение, равное $T_6 = 97\text{ }^\circ\text{C}$, а на 29-й мин запускается конденсатор, что приводит к резкому изменению температур: пара на выходе из испарителя T_6 ; на входе и выходе из конденсатора T_7 и T_8 и в компенсационной полости T_5 . Примерно через 31...32 мин установка полностью выходит на установившийся режим и далее все температуры остаются постоянными в течение всего эксперимента. Следует обратить внимание на температуру конденсата на выходе. Конденсат при $T_8 = 28\text{ }^\circ\text{C}$ поступает в КП, где он нагревается до температуры на верхней поверхности фитиля. В фитиле давление и температура теплоносителя повышаются до соответствующих значений в испарителе и далее процесс повторяется.

Эксперимент был повторен при тепловых нагрузках 100, 120 и 140 Вт. Результаты экспе-

риментальных исследований при тепловой нагрузке 120 Вт представлены на рис. 3, б. На рисунке видно, что температуры $T_2 = T_3 = 100\text{ }^\circ\text{C}$, т. е. остались прежними, поскольку давление не изменилось. Другие температуры незначительно возросли, что свидетельствует о более интенсивном процессе парообразования. Это отразилось на работе конденсатора, который стал более плавно запускаться.

Выводы

1. Разработана, создана и экспериментально исследована модель плоской КТТ с открытой компенсационной полостью.
2. Экспериментально получена зависимость от времени значений температуры во всех характерных точках контура исследуемой КТТ.
3. Экспериментально установлена область парообразования (поверхность теплообмена, ребра и нижняя часть фитиля).

Литература

- [1] Китаев А.И., Лукс А.Л., Порядин А.В. Тепловые трубы повышенной тепловой проводимости — как базовые элементы системы терморегулирования в аэрокосмической технике. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*, 2009, № 3(19), с. 98–101.
- [2] Майданик Ю.Ф. Достижения и перспективы развития контурных тепловых труб. *4-я конф. по тепломассообмену*. Москва, МЭИ, 2006, с. 84–92.
- [3] Майданик Ю.Ф. Контурные тепловые трубы — высокоэффективные теплопередающие устройства. *Инновации*, 2003, № 5(62), с. 83–86.
- [4] 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, issue 5–6, pp. 894–901.
- [5] 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, issue 1, pp. 32–45.

- [6] 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.
- [7] Yakomaskin A.A., Afanasiev V.N., Zubkov N.N., Morskoy D.N. Investigation of heat transfer in evaporator of microchannel loop heat pipe. *Proceedings of ASME 2012 Heat Transfer Summer Conferences 10th Int. Conf. on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, HT 201*, 2012, vol. 2, pp. 539–546.
- [8] Кисеев В.М. *Тепломассоперенос и фазовые превращения в мелкопористых капиллярных структурах*. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Екатеринбург, 2001. 332 с.
- [9] Зубков Н.Н., Шашков С.Э. Получение поверхностей интенсивного кипения методом деформирующего резания. *Материалы Всерос. науч.-техн. конф. Машиностроительные технологии*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, с. 60.
- [10] Зубков Н.Н. Оребрение труб теплообменных аппаратов подрезанием и отгибкой поверхностных слоев. *Новости теплоснабжения*, 2005, № 4, с. 51–53.

References

- [1] Kitaev A.I., Luks A.L., Poriadin A.V. Teplovye truby povyshennoi teplovoi provodimosti — kak bazovye elementy sistemy termoregulirovaniia v aerokosmicheskoi tekhnike [Using of heat-pipes with increased heat conduction as core elements of system of thermal control for aerospace equipment]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* [Vestnik of Samara state aerospace University]. 2009, № 3(19), pp. 98–101.
- [2] Maidanik Iu.F. Dostizheniia i perspektivy razvitiia konturnykh teplovykh trub [Achievements and prospects of the loop heat pipes]. *4-ia konferentsiia po teplomassoobmenu* [4th Conference on Heat and Mass Transfer]. Moscow, MPEI publ., 2006, pp. 84–92.
- [3] Maidanik Iu.F. Konturnye teplovye truby — vysokoeffektivnye teploperedaiushchie ustroistva [Contour heat pipes - highly efficient heat-transfer devices]. *Innovatsii* [Innovation]. 2003, no. 5(62), pp. 83–86.
- [4] 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, issue 5–6, pp. 894–901.
- [5] 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, issue 1, pp. 32–45.
- [6] 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.
- [7] Yakomaskin A.A., Afanasiev V.N., Zubkov N.N., Morskoy D.N. Investigation of heat transfer in evaporator of microchannel loop heat pipe. *Proceedings of ASME 2012 Heat Transfer Summer Conferences 10th Int. Conf. on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, HT 201*, 2012, vol. 2, pp. 539–546.
- [8] Kiseev V.M. *Tplomassoperenos i fazovye prevrashcheniia v melkoporistykh kapilliarnykh strukturakh*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Heat and mass transfer and phase transformations in capillary porous structures. Dr. tech. sci. diss.]. Ekaterinburg, 2001. 332 p.
- [9] Zubkov N.N., Shashkov S.E. Poluchenie poverkhnostei intensivnogo kipeniia metodom deformiruiushchego rezaniia [Getting surfaces intensive boiling method of deforming cutting]. *Materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Mashinostroitel'nye tekhnologii»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference «Engineering Technology»]. Moscow, Bauman Press, 2008, p. 60.
- [10] Zubkov N.N. Orebrenie trub teploobmennyykh apparatov podrezaniem i otgibkoi poverkhnostnykh sloev [The finned tubes, heat exchangers cutting and fold the surface layers]. *Novosti teplosnabzheniia* [News of heat supply]. 2005, no. 4, pp. 51–53.

Информация об авторах

АФАНАСЬЕВ Валерий Никанорович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

НЕДАЙВОЗОВ Алексей Викторович (Москва) — аспирант кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: alex-gaz-master@ya.ru).


ЯКОМАСКИН Александр Алексеевич (Москва) — научный сотрудник кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Information about the authors

AFANAS'EV Valeriy Nikanorovich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Thermal Physics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation).

NEDAYVOZOV Aleksey Viktorovich (Moscow) — Post-Graduate of «Thermal Physics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: alex-gaz-master@ya.ru)

YAKOMASKIN Aleksandr Alekseevich (Moscow) — Researcher of «Thermal Physics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation).



С. В. Грубый

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышла свет монография
С.В. Грубого
**«Оптимизация процесса механической обработки
и управление режимными параметрами»**

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса резания и изнашивания инструментов. Проведено математическое моделирование процесса и дана методика многофакторной аппроксимации полиномиальными уравнениями экспериментальных зависимостей резания металлов. Выполнен анализ методов и рассмотрены типовые задачи оптимизации режимных параметров. Разработаны математические основы оптимизации и управления режимными параметрами механической обработки с использованием уравнений скорости изнашивания инструментов.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru