

## ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ ПОВЫШЕННОЙ ТЕПЛОВОЙ ПРОВОДИМОСТИ – КАК БАЗОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

©2009 А. И. Китаев<sup>1</sup>, А. Л. Лукс<sup>2</sup>, А. В. Порядин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс»

<sup>2</sup>Самарский государственный университет

В данной статье представлены основные теплофизические характеристики тепловых труб повышенной тепловой проводимости, которые имеют осевые канавки, выполненные из алюминиевого сплава АД31.

*Тепловые трубы, системы обеспечения теплового режима, теплоемкость, термическое сопротивление, алюминиевые профили, структурные канавки*

Благодаря сверхвысокой эффективной теплопроводности тепловые трубы (ТТ) широко применяются в системах охлаждения, термостатирования или терморегулирования тепловыделяющей аппаратуры и оборудования ракет-носителей и космических аппаратов, а также в системах утилизации теплоты, подготовки топлива в двигателях внутреннего сгорания и газотурбинных двигателях и в других энергетических установках и теплообменных аппаратах: для охлаждения горячего газа после компрессорных станций; для регулирования радиального зазора по длине проточного тракта компрессора при помощи кольцевой ТТ; в качестве рекуперативных теплообменников на ТТ для утилизации низкопотенциальной теплоты и подогрева холодного воздуха; в качестве мощных рекуперативных теплообменников на ТТ (1-1,5 МВт), используемых с целью охлаждения (доконденсации) паров бензина перед резервуарным парком (Самарский, Сызранский и Новокуйбышевский нефтеперерабатывающие заводы); для уменьшения тепловых потерь с продуктами сгорания теплогенерирующих установок при использовании конденсационных теплообменников на ТТ, напорная ( $P \approx 0,2$  МПа,  $t \approx 130$  °С) и безнапорная ступени (г. Воронеж); для обеспечения парообразования пленки бензина, скапливающегося в нижней части карбюратора, и гомогенизации топливоздушнoй смеси, повышения полноты сжигания топлива и уменьшения токсичности отработавших газов (медная ТТ на дистиллированной воде с тепловой мощностью 120...150 Вт, КБ дви-

гателестроения “АвтоВаза”); в системах терморегулирования транспортных средств – автомобилей, судов и летательных аппаратов для стабилизации температуры выше точки росы поверхности прозрачной пластины (например, защитного стекла) и устранения осадка конденсата из влажного воздуха (кольцевая ТТ, пароходство «Волготанкер»); для двигателей тракторов и автомашин, валов и роторов машин, включая электрические двигатели и газовые турбины (вращающиеся ТТ); для охлаждения (или подогрева) масла в картере двигателя; в качестве термоплат на ТТ для использования солнечной энергии; для использования тепла ядерных реакторов и хранилищ ядерного горючего; для утилизации тепла вторичных ресурсов (газов, воздуха, воды) промышленных предприятий с целью экономии топлива и т. д.

ТТ обеспечивают передачу тепловых потоков значительной плотности (от 0,01 до 20 Вт/см<sup>2</sup>) при минимальном перепаде температур.

Промышленным производством (г. Самара) освоены высокоэффективные ТТ с продольными конструкционными канавками из алюминиевого сплава АД31 (6060 по международному стандарту). Разработана методика расчета ТТ и ТТТ, технология изготовления, заправки, герметизации ТТ, а также методы различных тепловых испытаний ТТ в лабораторных и заводских условиях с применением эффективных средств нагрева и охлаждения при моделировании тепловых процессов ТТ. Несмотря на то, что на КА используется жидкостное охлаждение при по-

мощи концевых теплообменников для эффективного охлаждения в зоне теплоотвода ТТ при испытаниях используются кулеры, применяемые в компьютерной технике (алюминиевые, алюминиево-медные оребренные радиаторы с пластмассовыми высокооборотными вентиляторами), а в зоне нагрева – короткие и длинные гибкие омические нагреватели.

Испытаниям в лаборатории «Теплоэнерготехника» СамГУ подвергались ТТ различных размеров и конфигураций из профилей с высотой (наружным диаметром)  $H=14$  мм: АС-КРА7.5-Р1-30 и АС-КРА7.5-Р1-120. Здесь параметры 30 и 120 обозначают ширину полок ТТ. Длина типоразмеров прямолинейных и криволинейных ТТ изменялась от 700 до 2500 мм. Масса аммиака особой чистоты (99,9999%), заправленного в ТТ из профиля АС-КРА7.5-Р1-30 при 30% избытке  $\approx 40$  г, а при 10% избытке  $\approx 34$  г (по расчету  $\approx 31$  г). Максимальная тепловая мощность ТТ - до 260 Вт. При подводимой тепловой мощности, равной  $15\pm 2$  Вт и температуре тепловых труб в транспортной зоне  $20\pm 2^\circ\text{C}$  перепад температур по длине труб – до  $0,2\dots 0,4^\circ\text{C}$  (менее  $1^\circ\text{C}$ ). Максимальная мощность отдельной ТТ из профиля АС-КРА7.5-Р1-30 (120) обуславливает конструкцию крупного теплообменника из пакета ТТ, обладающего большой мощностью. Таким образом, испытываемые ТТ обладают низким термическим сопротивлением и, следовательно, высокой тепловой проводимостью. Это является особенно важным и необходимым для утилизации низкопотенциальных энергоресурсов при помощи ТТ.

Масса каждой ТТ из профиля АС-КРА7.5-Р1-30 длиной  $L=1762$  мм в диапазоне  $0,5\dots 0,53$  кг. Замена сплошных жидкостных каналов змеевика системой из двухфазных ТТ, где жидкая пленка на поверхности капиллярных канавок имеет малую толщину, а остальное пространство внутри канала ТТ занято паром, плотность которого на два порядка меньше плотности жидкости, резко сокращает массу теплоносителя и металла в системе и одновременно потребную мощность для перекачки рабочего теплоносителя в СОТР, т.е. такая система не требует блока мощных механических насосов.

Автономность работы каждой ТТ создает им особые преимущества перед иными способами термостатирования объектов, например, малых спутников. Конструкцию элементов СОТР целесообразно строить, используя принцип их совмещения с силовыми элементами малых спутников. ТТ размещены внутри сото- или термопанелей. Они одновременно выполняют роль корпуса и термостабилизированных платформ (ТСП).

ТТ работают в условиях космической невесомости, холода и вакуума, по крайней мере, также хорошо, как и на Земле в условиях гравитации. ТТ позволяют рассеивать или концентрировать тепловые потоки большой плотности, разделять и разветвлять в пространстве конструкции источники и стоки теплоты. ТТ удовлетворяют требованиям перспективности (по геометрическим, энергетическим, экономическим показателям, герметичности, жёсткости, материалоемкости, транспортабельности и защищённости от вредных механических, химических и других воздействий и энергосбережения). Применение высокотеплопроводных ТТ в качестве базовых элементов СОТР малых спутников позволяет передавать потоки на значительные расстояния при малых температурных напорах (низких термических сопротивлениях). Широта температурного диапазона теплоносителей, практическая неограниченность разнообразных конструктивных форм и размеров, возможность встроить ТТ в прибор, в соты термопанели, радиатора-охлаждителя определяют гибкость проектирования элементов СОТР малых спутников.

Капиллярное ограничение (впитывание) проявляется как ограничения её мощности или эффективной длины. В том и другом случае это связано с суммарной величиной потерь давления, главным образом при движении паровой и жидкой фаз на транспортном (адиабатном) участке, где их расходы сохраняются постоянными.

Указанные ТТ обеспечивают эффективное охлаждение, термостабилизацию и высокую изотермичность по длине в составе сотопанелей ТСП и радиаторов, например изотермичность ТСП, на которой установлено оптико-электронная аппаратура (ОЭА) системы слежения за звёздами.

Последние с одной стороны могут вмещать в себе функции оснований ТСП для установки тепловыделяющей аппаратуры, а с другой - излучающих радиаторов (РТО) сотовой конструкции или нет. Если функции ТСП и РТО разделены, то связь между ними обеспечивается с помощью регулируемых контурных тепловых труб (КТТ). Существенно повысить теплопередающую способность НТТ возможно на основе новой схемы испарителя с перевернутым (обратным) мениском. Этот принцип позволяет осуществить КТТ. КТТ по мощности в 2...3 раза превосходят обычные ТТ, используемые для охлаждения тепловыделяющего оборудования. При неблагоприятных положениях в пространстве, когда передача тепла осуществляется сверху вниз, это преимущество может достигать 5...10 раз. В некоторых случаях, особенно при  $q > 50 \text{ Вт/см}^2$  КТТ способны обеспечить передачу тепла, которое недоступно любому количеству обычных ТТ.

При этом сотовые панели выполняют роль термостабилизированных платформ (ТТ, вмонтированные в сотовые панели, могут быть нерегулируемыми (постоянной тепловой проводимости и термического сопротивления) и газорегулируемыми (переменной тепловой проводимости и термического сопротивления). ТТ переменной проводимости позволяет регулировать температуру объектов малых спутников в узких пределах. Газорегулируемые ТТ позволяют снизить мощность компенсирующих электронагревателей, используемых при минимальных тепловыделениях полезной нагрузки (ПН).

Основной элемент построения СОТР – одно- или двухслойная алюминиевая панель с ТТ. Сотовая панель используется для снижения шума газовых потоков в каналах турбореактивных двухконтурных двигателей (ТРДД). Нарботки в области технологии высокоэффективных звукопоглощающих конструкций (ЗПК) с сотовым наполнителем в ТРДД академика Н.Д. Кузнецова и его сотрудников [1] оказались востребованными в наше время. ЗПК является несущей жаропрочной конструкцией, успешно выдерживающей механические, тепловые, вибрационные и другие воздействия при минимальной толщине, массе и высокой акустической эффективности.

Оптимальное соотношение параметров сотовых панелей, строительная высота, толщина и материал обшивки; количество и характеристики ТТ обеспечивают панелям наряду с высокими тепловыми характеристиками необходимую прочность и размерную стабильность. Термическое сопротивление ТТ сотовой панели:  $R_{ТТ} = 0,03 \pm 0,01 \text{ К/Вт}$ ; термическое сопротивление сотовой панели:  $R = 0,08 \pm 0,02 \text{ К/Вт}$ . Изотермичность по поверхности панели:  $\approx 2...3^\circ\text{C}$ . Удельная масса сотовой панели до  $0,65...0,80 \text{ кг/м}^2$

Наиболее эффективными поверхностями для отвода избыточного тепла от оборудования малых спутников являются поверхности панелей, расположенных на северной и южных сторонах, так как они в меньшей степени подвержены воздействию солнечного излучения.

Сотовые наполнители изготавливаются из различных материалов: металлической фольги (Al, Ti, нержавеющие стали и др.); на основе тканей из стекловолокон с пропиткой полимерным связующим; полимерной бумаги, пропитанной различными смолами (фенилон, номекс). С целью минимизации термических деформаций конструкций при эксплуатации в качестве материала сотового наполнителя выбрана фольга из алюминиевого сплава толщиной 0,03 мм. На сотовые панели устанавливается тепловыделяющее оборудование. Необходимо обеспечить по посадочным местам достаточно высокую прочность и жесткость панели. В качестве наполнителя для этой панели выбраны соты с размером ячейки 2,5 мм.

Для создания необходимой изотермичности сотовой панели между наружными обшивками (обшивками) термопанели или радиатора монтируются тепловые трубы (ТТ), оказывающие термостатирующее влияние на поверхности теплообмена. Наиболее предпочтительны для этих целей ТТ повышенной тепловой проводимости и низким термическим сопротивлением с  $\Omega$ -образным (капельным) канавчатым конструкционным фитилем.

Проект КА может задействовать ТТ повышенной проводимости, встроенные (вмонтированные) в сотовые панели радиатора. При этом обеспечиваются высокоэффектив-

ные по массе средства однородного распределения тепла по поверхности радиатора по сравнению со сплошными пластинами традиционных средств охлаждения. Изотермализирующая природа ТТ уменьшает температуры высокомоощных компонентов тепловыделяющего оборудования, увеличивая таким образом надёжность их работы. Выигрыш в массе даёт возможность распределения массы КА в пользу систем энергопитания, двигателей и полезной нагрузки. Это представляется важным, как, для коммерческих спутников связи, так как увеличивает потенциал доходов предприятия и уменьшает срок их окупаемости, так и других высокоэнергетических установок в народном хозяйстве.

коэнергетических установок в народном хозяйстве.

### Библиографический список

1. Кузнецов, Н.Д. Акустика газовых потоков турбореактивных двухконтурных двигателей: учеб. Пособие / Н.Д. Кузнецов, И.С. Загузов, А.П. Комаров. – Уфа, УАИ, 1984. – 101 с.

### References

2. Kuznetsov N.D. Zaguzov I.S., Komarov A.P. Gas flows' acoustics of bypass turbofan engines. – Ufa, UAI, 1984. – 101 p.

## USING OF HEAT-PIPES WITH INCREASED HEAT CONDUCTION AS CORE ELEMENTS OF SYSTEM OF THERMAL CONTROL FOR AEROSPACE EQUIPMENT

©2009 A. I. Kitaev<sup>1</sup>, A. L. Luks<sup>2</sup>, A. V. Poryadin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Scientific Production Space-Rocket Centre “TsKB Progress”

<sup>2</sup>Samara State University

This paper, executed under the direction of doctor of engineering sciences, professor of Biryuka Vladimir Vasil'evicha, studies the main thermal physic characteristics of heat-pipes with increased heat conduction, which have axial grooves made of aluminum alloy AD31 as wick.

*Heat-pipes, systems of thermal control, thermal capacity, thermal resistance, aluminum shapes, structural grooves, wick*

### Информация об авторах

**Китаев Александр Иванович**, начальник отдела Государственного научно-производственного ракетно-космического центра «ЦСКБ-Прогресс». Тел. (846) 270-56-12. E-mail: [Teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:Teplotex_ssau@bk.ru). Область научных интересов: тепломассообмен, термодинамика.

**Луks Александр Леонидович**, кандидат технических наук, доцент Самарского государственного университета. Тел. (846) 278-09-21. E-mail: [Teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:Teplotex_ssau@bk.ru). Область научных интересов: тепломассообмен, термодинамика.

**Порядин Александр Викторович**, кандидат технических наук, доцент Самарского государственного университета. Тел. (846) 278-09-21. E-mail: [Teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:Teplotex_ssau@bk.ru). Область научных интересов: тепломассообмен, термодинамика.

**Kitaev Aleksandr Ivanovich**, group director of «Progress» Design Bureau, Samara. Phone: (846) 270-56-12. E-mail: [Teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:Teplotex_ssau@bk.ru). Area of Research: teplomassoobmen, thermodynamics.

**Luks Aleksandr Leonidovich**, candidate of technical science, docent of Samara State University. Phone: (846) 278-09-21, E-mail: [Teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:Teplotex_ssau@bk.ru). Area of Research: teplomassoobmen, thermodynamics.

**Poryadin Aleksandr Viktorovich**, candidate of technical science, docent of Samara State University. Phone: (846) 278-09-21. E-mail: [Teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:Teplotex_ssau@bk.ru). Area of Research: teplomassoobmen, thermodynamics.