

УДК 621.643.2:536.24

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ АММИАЧНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СИСТЕМ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА<sup>1</sup>**

© 2007 А.Л. Лукс, А.Г. Матвеев<sup>2</sup>

Работа представляет собой экспериментальное исследование, выполненное по заказу с ФГУП ГНП РКЦ "ЦСКБ-ПРОГРЕСС". Проведены конструкторско-доводочные, включая ресурсные, испытания высокоэффективных тепловых труб на основе облегченного профиля АС-КРА 7,5-Р1-120/0, ТУ 550.1-02070921.007-03 из алюминиевого сплава АД31 по российским стандартам ГОСТ 4784-74 и ГОСТ 22233-93 или из сплавов 6060, 6061, 6063 по американскому стандарту AMS 4116. Определены теплофизические характеристики тепловых труб (температурное поле, перепады температур, тепловая проводимость, термическое сопротивление) различных типоразмеров и конфигураций (прямолинейных и криволинейных) как основных базовых элементов систем терморегулирования крупногабаритных конструкций космического аппарата (отсека телескопа, радиаторов-охладителей).

### **Введение**

Цель работы: создание научно-технического задела по проектированию, изготовлению и испытаниям высокоэффективных тепловых труб систем терморегулирования крупногабаритных конструкций космических летательных аппаратов нового поколения с оптимальными конструктивно-технологическими и эксплуатационными характеристиками.

Исследование и разработка связаны с проблемой энергетики, энергосбережения и наращивания регулировочных свойств систем обеспечения теплового режима (СОТР) космических аппаратов прикладного назначения: для дистанционного зондирования Земли, навигации, радиосвязи, телевидения, инженерной картографии, геодезии, лесного и сельского хозяйства и т.п. Функционально СОТР обеспечивает транспортировку, распределение и потребление тепла на космическом аппарате. Энергетический комплекс любого космического аппарата (КА) составляют системы электропитания, системы обеспечения теплового режима (СОТР) и

<sup>1</sup>Представлена доктором физико-математических наук, профессором Ю.Н. Радаевым.

<sup>2</sup>Лукс Александр Леонидович, Матвеев Андрей Григорьевич ([Matveev1974@yandex.ru](mailto:Matveev1974@yandex.ru)), управление научных исследований Самарского государственного университета, 443011, Россия, г. Самара, ул. Акад. Павлова, 1.

двигательные установки. Одним из важнейших факторов в области теплоэнергетики КА, обуславливающих выполнение жестких требований, является обеспечение теплового режима для нормальной жизнедеятельности экипажа и работы сложных технических систем, способных в широком диапазоне температур и тепловых нагрузок обеспечить передачу, терморегулирование, термостабилизацию, термостатирования или утилизацию тепла.

Для выполнения этих задач предназначена СОТР и ее подсистема — система терморегулирования (СТР). При этом главное внимание уделяется проблеме обеспечения заданных тепловых режимов основных узлов корпуса КА, его двигательной установки, в частности топливных баков, электронных приборов, компьютерной техники, тепловыделяющих агрегатов и т.д.

К актуальным проблемам следует отнести разработку высокоточных и долгосрочных СТР крупногабаритных конструкций (корпусов телескопа, приборных и служебных отсеков, радиаторов-охладителей, термоплат и космических платформ) с оптимальными массо- и габаритно-энергетическими характеристиками, с высокой надежностью при эксплуатации.

Задача термостатирования оптической системы телескопа, платформы и других конструкций КА дистанционного зондирования (исследование природных ресурсов Земли, мониторинг чрезвычайных ситуаций, природных и техногенных катастроф) имеет стабильную тенденцию к ужесточению потребных характеристик температурного поля при внешних и внутренних тепловых воздействиях в связи с постоянным совершенствованием и усложнением конструкций и систем. Поэтому актуальными являются научно-технические задачи, связанные с тепловым регулированием на КА нового поколения, отличающимся экстремально сложным характером в условиях, когда разность температур между источником и стоком невелика, а теплоотдача при сбросе в условиях вакуума, микрогравитации путем излучения мала, в сочетании с сильными ограничениями по габаритам и массе при одновременно жестких требованиях по точности и надежности.

В России, как и в мире (NASA, ESA), наблюдается тенденция к росту габаритов, энерговооруженности и массы космических аппаратов, а также необходимость доведения их ресурса до 15–20 лет.

Развитие современных энергосберегающих технологий выдвигает актуальную задачу создания теплопередающих устройств на базе тепловых труб крупногабаритных элементов (корпуса телескопа, радиаторов-охладителей, термоплат и др.): проектирование, технологию изготовления, методов способов и средств испытаний (ПСИ, КДИ, ПИ). Тепловые трубы должны иметь более высокую тепловую мощность, тепловую проводимость, низкое термическое сопротивление, удовлетворять новым требованиям современных и перспективных технологий изготовления, сборки и адаптируемости по своим теплотехническим характеристикам к тепловыделяющим приборам и агрегатам КА.

Анализ тенденций и зарубежных прогнозов в области систем терморегулирования КА по материалам Европейского космического агентства до 2010–2020 гг. показывает, что развитие наиболее современных технологий выдвигает актуальную задачу создания новых теплопередающих устройств и систем, работающих по принципу ТТ — с капиллярным насосом для прокачки рабочих теплоносителей в определенных температурных диапазонах.

Решение этой проблемы сопряжено с применением теплопередающих устройств, работающих по замкнутому испарительно-конденсационному циклу с использованием капиллярного давления для прокачки рабочих теплоноси-

телей с чрезвычайно малыми расходами, либо других эффектов (например, электростатических, электромагнитных насосов).

Расширение границ ресурсов работы системы терморегулирования достигается необходимым широким заделом и резервированием двухфазных элементов (ТТ) особенно теплонапряженных крупногабаритных узлов и агрегатов, наиболее рациональным выбором комплекса выполняемых функций терморегулирования, термостатирования, термостабилизации и утилизации низкопотенциальной теплоты, выбором и качеством применяемых рабочих теплоносителей, выбором конструктивных и технологических решений по сопряжению ТТ с конструкциями КА или между собой и т.д.

Новизна предлагаемых подходов к решению повышения регулировочных свойств СТР КА заключается в комплексных теоретических и экспериментальных исследованиях оптимальных массо-, габаритноэнергетических теплотехнических характеристик ТТ, крупногабаритных устройств на ТТ с их конструктивно-технологической отработкой с учетом современных и перспективных требований с постоянным совершенствованием программ, методов, способов и средств проведения испытаний (ПСИ, КДИ, ПИ), с анализом и использованием перспективных авторских изобретений, патентов, в том числе и из смежных отраслей, с модернизацией стендового оборудования, приборов и датчиков при отработке.

Самостоятельное проведение теоретических и экспериментальных исследований дорогостоящих и сложных СОТР на тепловых трубах КА нового поколения с применением современных вычислительных систем выгодно прежде всего экономически (возможные аналогичные разработки и, тем более, закупки готовых изделий за рубежом по затратам в ESA и NASA на 2–3 порядка выше). Кроме того, самостоятельное проведение этих исследований на основе использования имеющихся заделов и новых современных подходов обеспечит генерацию знаний при профессиональной подготовке работников из молодежи, владеющих современными технологиями производства перспективных образцов космической, авиационной, компьютерной техники XXI века.

Объектами исследований являются базовые элементы и агрегаты СОТР КА нового поколения "Персона" на тепловых трубах (ТТ). Встроенные в СОТР ТТ различных типоразмеров и конфигурации должны обеспечивать гарантированный ресурс и точность регулирования (термостатирования) в соответствии с жесткими требованиями, предъявляемыми к специальной целевой термочувствительной аппаратуре телескопа, радиаторов-охладителей и платформы при тепловых воздействиях внешних и внутренних источников теплоты.

Предметом исследований являются основные положения и принципы формирования элементарно-агрегатной базы, методы и средства в области проектирования, технологического обеспечения, испытаний и эксплуатации и особенно в области повышения надежности, точности сложных технических СТР КА нового поколения на ТТ.

В энергетических установках (РКТ, атомной промышленности, ЖКХ) ТТ постепенно становятся важнейшей составной частью оборудования контроля и регулировки теплового состояния. В зависимости от заполняющей жидкости ТТ могут использоваться в диапазоне температур от 4 до 2300 К, но для космического использования наиболее важным является температурный диапазон от 250 до 320 К.

ТТ надежны при эксплуатации — при обеспечении требований совместимости материалов стенок корпуса и теплоносителей они могут функционировать неогра-

ниченно долго без существенного ухудшения своих теплофизических характеристик. В них отсутствуют движущиеся и трущиеся части. Это обеспечивает бесшумность, высокую надежность и длительный ресурс при работе в условиях изменений внутренних и внешних тепловых, а также механических воздействий. ТТ обладают достаточной механической прочностью, относительно малой массой, автономностью. Благодаря механизму капиллярного насоса ТТ во многих случаях не требуют дополнительной энергии для перекачки теплоносителей. Они отличаются высокой эффективной теплопроводностью и изотермичностью.

ТТ работают в условиях космической невесомости и вакуума, по крайней мере также хорошо, как и на Земле в условиях гравитации. ТТ позволяют рассеивать или концентрировать (трансформировать) тепловые потоки большой плотности, разделять и разветвлять в пространстве источники и стоки теплоты. ТТ удовлетворяют требованиям перспективности (по геометрическим, энергетическим, экономическим показателям, герметичности, жесткости, материалоемкости, транспортабельности и защищенности от вредных механических, химических и других воздействий) и энергосбережения.

Применение ТТ в качестве базовых элементов СТР 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 трубку в прибор, агрегат, в панель РТО или термоплаты определяют гибкость проектирования и технологии. Однако набор "великолепных" перспективных показателей в определенной степени "компенсируется" сложностью расчета, проектирования, технологии подготовки, изготовления, испытаний непосредственно ТТ и сложностью теплового и гидравлического взаимодействия их с другими элементами СТР (теплообменниками, контуром циркуляции).

Применение ТТ способствует повышению экономичности и энергосбережению и, следовательно, эффективности энергосистем (небольшое собственное потребление энергии, способность к утилизации теплоты, возможность использовать вредные тепловыделения).

## 1. Экспериментальная часть

Разрабатываемые конструкции тепловых труб различных типоразмеров и конфигураций, как базовых элементов СТР КА "Персона", "Ресурс-ДК1", обладают уникальной совокупностью ценных эксплуатационных (потребительских) свойств.

Крупногабаритные конструкции "долгоживущих" СОТР (СТР) КА (корпуса телескопа, платформы, термоплаты, радиаторы) разрабатываются на основе термостатирующих ТТ нового поколения с повышенным ресурсом работы не менее 15 лет. Для их создания используются ТТ из алюминиевых профилей АД-31 с оптимизированной капиллярной структурой, но и с внешней геометрией, позволяющей конструировать протяженные теплообменные поверхности с определенной по техническому заданию максимальной тепловой мощностью (до 300–500 Вт). Они наиболее приспособлены для этих целей и имеют технологические полки для крепления и восприятия тепловой и механической нагрузки от приборов. Принципиально ТТ с продольными канавками отличаются от других типов видом и способом изготовления капиллярной структуры. Капиллярная канавчатая структура аксиальных тепловых труб изготавливается как единое целое вместе с корпусом ТТ из алюминиевого сплава АД31 по российским стандартам ГОСТ 4784-74 и

ГОСТ 22233-93 или сплавов 6060, 6061, 6063 по американскому стандарту AMS 4116 методом экструзии (прессования) под высоким давлением через специальную охлаждаемую матрицу, обеспечивающим высокую точность параметров по длине. К используемым материалам и теплоносителям в ТТ выдвигаются особые жесткие требования. По своим механическим свойствам профили закаленные и искусственно состаренные должны соответствовать следующим требованиям: временное сопротивление разрыву не менее 20 кгс/мм<sup>2</sup>; предел текучести не менее 15 кгс/мм<sup>2</sup>; относительное удлинение при растяжении не более 8%. Профиль должен выдерживать испытание на прочность давлением 200 атм. (кгс/см<sup>2</sup>) в течение 10 мин при температуре 20 °С и испытание на герметичность при внутреннем давлении 130 атм. (кгс/см<sup>2</sup>) после выдержки под этим давлением при температуре 125 °С в течение 10 часов. Микроструктура профилей не должна содержать трещин, расслоений, неметаллических включений, коррозионных пятен и раковин. Рабочий теплоноситель ТТ — аммиак марки А специально очищенный (99,9999%). Не допускается использовать аммиак с содержанием влаги более 0,006% или масла более 0,5 мг/л.

В процессе производства низкотемпературных ТТ вследствие нарушения некоторых технологических операций или несовершенства конструкции возникают отклонения, приводящие к несоответствию параметров ТТ заданным требованиям (недозаправка или перезаправка ТТ рабочим теплоносителем, нарушение геометрии парового канала, заливочной трубки или капиллярной структуры, низкое качество сварных и паяных соединений элементов теплопередающего устройства, увеличение зазоров (неприлеганий) между гофрами капиллярной структуры, между сеткой и корпусом).

Поэтому важным этапом в создании ТТ является контроль их основных теплотехнических характеристик при конструкторско-доводочных (КДИ) и приемосдаточных испытаниях (ПСИ).

Ресурсные испытания различных типов ТТ проводились многими исследователями. Однако данные ресурсных испытаний одной лаборатории, не всегда можно удовлетворительно использовать для конструирования ТТ в другом предприятии, если конструкция, технология сборки, сварки ТТ и отработки материалов являются нестандартными (т.е. подвергаются существенным изменениям). Это целиком можно отнести и к разрабатываемым крупногабаритным конструкциям: корпусу телескопа, радиаторам-охладителям на основе ТТ. В них ТТ подвергаются значительному изгибу ( $R$  до 1810 мм), а полки ТТ снабжены специальной отбортовкой для соединения труб в единую сварную конструкцию или отверстиями для заклепок, предназначенных для соединения ТТ к корпусу телескопа. Недозаправка или перезаправка рабочим теплоносителем, наличие изгиба и отборонок "искажает" геометрию ТТ — парового канала, капиллярной структуры фитиля, полок и, естественно, влияет на определение теплотехнических характеристик ТТ при испытаниях. При этом соединение ТТ с помощью сварки по месту отборонок в единую крупногабаритную конструкцию радиаторов-охладителей также влияет на распределение температурного поля и на среднеинтегральную температуру поверхности при эксплуатации.

Разработана конструкторско-технологическая документация и пакеты программ для определения теплотехнических характеристик различных типоразмеров ТТ. Техническая документация, включая программы и методики, предназначена для проектирования, изготовления и проведения испытаний партии ТТ штатного изделия с целью определения их теплофизических характеристик. Они разработа-

ны с учетом комплексной программы экспериментальной отработки конструкции СОТР и определяют цель, задачи, объем, последовательность и методы испытаний экспериментальных образцов опытных и штатных партий ТТ, а также требования к технологическим стендам и измерительной аппаратуре и термометрам (термодатчикам).

В состав разработанной технической документации входят:

- технологическая инструкция по изготовлению ТТ с внутренними аксиальными канавками из алюминиевого сплава АД31 с повышенными механическими свойствами;
- сборочные чертежи на ТТ;
- программа и методика лабораторно-отработочных, аттестационных испытаний экспериментальных образцов ТТ;
- программа и методика определения теплофизических характеристик (проверка передаваемой мощности и работоспособности) ТТ при проведении ПСИ, КИ, ПИ;
- программа и методика конструкторско-доводочных испытаний (КДИ) ТТ;
- программа и методика испытаний ТТ на безотказность в процессе длительного функционирования (ресурсных испытаний);
- методика расчета параметров ресурсных испытаний ТТ;
- программа и методика определения длины заблокированной неконденсирующими газами зоны ТТ.

Для определения теплофизических характеристик ТТ решались следующие задачи:

- отработка методического обеспечения всех видов теплофизических испытаний;
- отработка конструкции ТТ;
- проведение входного контроля ТТ;
- определение разности температур по длине ТТ при заданной передаваемой мощности;
- определение максимальной передаваемой мощности ТТ; определение максимальной передаваемой мощности ТТ;
- определение длины зоны конденсации ТТ, заблокированной не конденсирующими газами;
- отработка методики и проведение ускоренных ресурсных испытаний ТТ;
- подтверждение эффективности концевых теплообменников.

Разработан новый метод проверки основных характеристик прямолинейных и криволинейных узких и широких ТТ, позволяющий промоделировать плотность теплового потока по длинам в зоне нагрева (испарения) и охлаждения (конденсации) при ПСИ и КДИ, используя "гибкие" или "жесткие" омические нагреватели и кулеры (охладители), применяемые для охлаждения процессоров компьютеров. Кулеры представляют из себя алюминиевые радиаторы с цельнометаллическим "стволом" и расходящимися "ветвями ребер охлаждения". Для улучшения теплопроводности центральный ствол выполнен из толстостенной медной трубки, которая непосредственно сопрягается с "горячими" участками ТТ. Сверху на радиаторе закреплен вентилятор, вдувающий воздух в пространство между ребрами радиатора. Этим достигается наилучшая теплоотдача от ребер к воздуху (теплоотвод). Эффективность охлаждения ТТ зависит от площади ребер, габаритов

радиатора и трубы, от материала, из которого он изготовлен, мощности двигателя вентилятора и количества кулеров размещаемых в зоне конденсации ТТ.

После заправки ТТ проходят испытания по контролю основных теплофизических характеристик (передаваемой тепловой мощности, уровней и перепада температур, термического сопротивления, тепловой проводимости, коэффициента теплопередачи и др.) в составе приемосдаточных испытаний (ПСИ) и конструкторско-доводочных испытаний (КДИ). Это гарантирует высокую надежность при эксплуатации ТТ. Их ресурс до 15 ... 20 лет. Рабочий диапазон аммиачных ТТ от  $-80^{\circ}\text{C}$  до  $+120^{\circ}\text{C}$ .

*Экспериментальная база:* три установки для лабораторно-отработочных, приемосдаточных и конструкторско-доводочных испытаний (ЛОИ, ПСИ, КДИ) ТТ, термоплат и радиаторов на ТТ и других типов теплообменников, комплекты измерительной аппаратуры и термодатчиков (термометров). Для измерения температур на корпусе ТТ использовались термометры ТМ221-02, которые имеют практически линейную зависимость сопротивления от температуры  $R = f(t)$ . Сопротивления чувствительного элемента термометров при  $0^{\circ}\text{C}$  составляли для зав. №ИТ050074 —  $R = 199,9881$  Ом, зав. №ИТ050079 —  $R = 199,3438$  Ом. Гарантийный срок 12 лет, в том числе хранение 18 мес. в составе изделия с 14 июня 2005 г. Термометры соответствуют БЫ 2.821.221ТУ, изготовлены по стандарту РК-98. Гарантийная наработка в пределах гарантийного срока при температуре  $25^{\circ}\text{C}$  — 18000 часов. Для измерения сопротивлений использовались универсальные измерительные приборы Р4833 с классом точности 0,1–0,05. При КДИ для измерения температур на корпусе ТТ использовались термометры ТП018-05, которые имеют нелинейную зависимость сопротивления от температуры  $R = f(t)$ . Сопротивления чувствительного элемента термометров при  $20^{\circ}\text{C}$  составляли для зав. №Ит909856 —  $R = 107,82$  Ом, зав. №Ит864682 —  $R = 108,2$  Ом. Градуировочная характеристика термометров определяется по БЫ0.282.010ИЭ1, таб.17, гр. 2 в рабочем диапазоне температур. Термометры изготовлены по стандарту РК-75. Гарантийная наработка термометров ТП018-05 в пределах гарантийного срока в диапазоне температур от  $-10$  до  $+150^{\circ}\text{C}$  — 55000 часов и полностью удовлетворяет программе и методике конструкторско-доводочных испытаний ТТ.

При испытаниях использовалась следующая вычислительная и оргтехника: 1) персональный компьютер — Pentium IV; 2) сканер — HP ScanJet 4100; 3) лазерный принтер — HP LaserJet 1010, а также лицензионные пакеты прикладных программ: 1) LabVIEW — пакет для сбора и обработки экспериментальных результатов; 2) Maple V; 3) ANSYS 5.3; 4) NAG (numerical algorithm group) — пакет процедур и функций для языков программирования PASCAL и FORTRAN; 5) Delphi 3.0.

При эксплуатации ТТ в рабочем теплоносителе, капиллярной структуре фитиля и на внутренней поверхности происходит ряд сложных физико-химических процессов. Они приводят к образованию твердой фазы, осадка и неконденсирующегося газа (водорода и азота). Последний постепенно скапливается в конце зоны конденсации и существенно изменяет первоначальные теплотехнические параметры ТТ (тепловую проводимость, термическое сопротивление, коэффициент теплопередачи), если занимает активную зону конденсации. Скорость протекания этих процессов различна. Она определяется характером взаимодействия рабочего теплоносителя с пористой структурой фитиля и материалом стенки трубы, а также термодинамическими характеристиками каждого из этих элементов. Повышение рабочей температуры в трубе значительно интенсифицирует эти процессы, не изменяя качественно их характера.

Это дает возможность промоделировать скорость образования неконденсирующегося газа и осадка в зависимости от температуры и времени и дать прогноз на весь период хранения и эксплуатации ТТ при резком сокращении объема и времени испытаний.

Назначенный срок службы должен быть не менее 12 лет, в том числе 5 лет натурной эксплуатации и 7 лет хранения, из которых 3 года в составе объекта и 4 года в штатной упаковке в складских условиях при температуре  $25 \pm 10^\circ\text{C}$  и влажности до 85%.

Расчет величины газовой выделения и длины "газовой пробки", которая формируется в конце зоны конденсации ТТ, основан на материалах по радиационно-химической и термической стойкости аммиака ( $\text{NH}_3$ ), а также на использовании законов идеальных газов и уравнения Аррениуса.

Общий вид функциональной зависимости изменения концентрации неконденсирующихся газов (НКГ) от внешних факторов воздействия для теплоносителей тепловых труб с учетом термического воздействия при орбитальном полете и хранении ТТ в составе изделий или отдельно в складских условиях:

$$C_{\text{НКГ}} = C_{\text{ХР}} + C_{\text{ПОЛ}} + C_{\text{РАД}}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{НКГ}}$  — суммарная массовая концентрация неконденсирующегося газа в ТТ после воздействия внешних факторов, %;  $C_{\text{ПОЛ}}$  — приращение массовой концентрации НКГ в ТТ после воздействия температурных факторов при орбитальном полете;  $C_{\text{ХР}}$  — приращение массовой концентрации НКГ в ТТ после воздействия температурных факторов при хранении;  $C_{\text{РАД}}$  — приращение массовой концентрации НКГ в ТТ после воздействия радиационных факторов.

Прирост концентрации НКГ как при термическом разложении аммиака, так и при радиолитических превращениях аммиака происходит за счет образования водорода ( $\text{H}_2$ ) и азота ( $\text{N}_2$ ), которые не конденсируются в ТТ. Разложение аммиака происходит по формуле:



Прирост концентрации НКГ при термическом разложении аммиака в обобщенном виде находим по формуле:

$$C_i = k\tau_i, \quad (3)$$

где  $k$  — константа скорости реакции термического разложения аммиака,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\tau$  — длительность термического воздействия, с;  $i$  — индекс, означающий "хр" (хранение) или "пол" (полет).

Константу скорости реакции определяем по известному уравнению Аррениуса

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_{\text{акт}}}{RT}\right), \quad (4)$$

где  $k_0$  — предэкспоненциальный множитель,  $\text{с}^{-1}$ ;  $T$  — температура реакции, К;  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $R = 8,314 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ .

Прирост концентрации НКГ при радиолитических превращениях аммиака происходит за счет образования стабильных молекул ( $\text{H}_2$  и  $\text{N}_2$ ), которые для газообразной и жидкой фаз аммиака в обобщенном виде рассчитываем по формулам:

$$n_{i,j} = G_{i,j} D m_i, \quad (5)$$

где  $m_i$  — масса аммиака в ТТ (в газовой или жидкой фазе), г;  $G_{i,j}$  — выход продуктов радиолиза (для газовой или жидкой фаз), молекул/100эВ;  $n_{i,j}$  — выход продуктов радиолиза (в газовой или жидкой фазах), молекул;  $i$  — индекс, означающий "г" (газ) или "ж" (жидкость);  $j$  — индекс, означающий  $\text{H}_2$  и  $\text{N}_2$ .

Массу НКГ, образованную в результате радиолитиза, находим по формуле:

$$m_{\text{НКГ(Р)}} = \mu_{\text{H}_2} \frac{n_{\text{H}_2}}{A} + \mu_{\text{N}_2} \frac{n_{\text{N}_2}}{A}, \quad (6)$$

где  $\mu_{\text{H}_2}$  и  $\mu_{\text{N}_2}$  — молекулярные массы водорода и азота (2 и 28 грамм/моль);  $A = 6,02 \cdot 10^{23}$  молекул/моль (число Авогадро);  $n_{\text{H}_2}$  — полное число молекул водорода, образовавшихся в результате разложения жидкого и газообразного аммиака;  $n_{\text{N}_2}$  — полное число молекул азота, образовавшихся в результате разложения жидкого и газообразного аммиака.

Прирост концентрации НКГ при радиолитизе аммиака рассчитываем по формуле:

$$C_{\text{РАД}} = \frac{m_{\text{РАД}}}{m_{\Sigma}}. \quad (7)$$

Из уравнения (1), на основе полученной суммарной массовой концентрации, определяем массу НКГ равную:

$$m_{\text{НКГ}} = m_{\Sigma} C_{\text{НКГ}}, \quad (8)$$

где  $m_{\Sigma}$  — масса аммиака, заправленного в ТТ.

Определение параметров длительности ускоренных испытаний производим по формуле:

$$\tau_{\text{РИ}} = \frac{C_{\text{НКГ}}}{k_{\text{РИ}}}, \quad (9)$$

где  $\tau_{\text{РИ}}$  — длительность ускоренных ресурсных испытаний, с;  $k_{\text{РИ}}$  — константа скорости реакции термохимического разложения аммиака при температуре ресурсных испытаний, рассчитанная по формуле:

$$k_{\text{РИ}} = k_0 \exp\left(-\frac{E_A}{R T_{\text{РИ}}}\right). \quad (10)$$

Температура, при которой проводятся ускоренные ресурсные испытания ТТ, может варьироваться в диапазоне от рабочей, при этом ускорения протекания реакций не будет происходить и продолжительность испытаний будет велика, до температур менее критической температуры аммиака (405,55 К). В ней разность удельных объемов, плотностей жидкой и газовой фаз, как и скрытая теплота парообразования равна нулю. Критическая точка — это конечная точка линии фазового перехода жидкость-пар. Полные ресурсные испытания должны предусматривать длительные исследования теплотехнических характеристик ТТ, близких к рабочим. Но в большинстве случаев конструкторы удовлетворяются ускоренными ресурсными испытаниями с экстраполяцией данных на более длительный период работы ТТ. В качестве температуры проведения ресурсных испытаний выбрана температура насыщенных паров аммиака  $T_{\text{РИ}} = 358 \text{ К}$  (85°C). В условиях полной теплоизоляции по длине она практически совпадает с температурой корпуса ТТ из-за малых термических сопротивлений элементов по сравнению с сопротивлением теплоизоляции.

В окончательном виде длительность ускоренных ресурсных испытаний находим по формуле:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{РИ}} = \tau_{\text{ХР}} \exp\left[-\frac{E_A}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{\text{ХР}}} - \frac{1}{T_{\text{РИ}}}\right)\right] + \\ + \tau_{\text{ПОЛ}} \exp\left[-\frac{E_A}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{ПОЛ}}} - \frac{1}{T_{\text{РИ}}}\right)\right] + \frac{m_{\text{РАД}}}{m_{\Sigma} k_0} \exp\left(\frac{E_A}{R T_{\text{РИ}}}\right). \end{aligned} \quad (11)$$

При расчете длины "газовой пробки", определяющую пассивную зону конденсации, принята модель "плоского фронта". По ней взаимная диффузия молекул НКГ и паров аммиака в конце зоны конденсации отсутствует, а "газовая пробка" представляет собой идеально упругое тело, подчиняющееся законам идеальных газов.

На основании этого по уравнению Менделеева–Клайперона рассчитываем объем "газовой пробки" из НКГ в конце зоны конденсации ТТ:

$$V_{\text{НКГ}} = \frac{m_{\text{НКГ}} R T_s}{\mu_{\text{см}} P_s}, \quad (12)$$

где  $V_{\text{НКГ}}$  — объем "газовой пробки", м<sup>3</sup>;  $m_{\text{НКГ}}$  — масса НКГ в ТТ, кг;  $R$  — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $P_s$  — давление насыщенных паров теплоносителя при температуре  $T_s$ , Па;  $T_s$  — температура, при которой оценивается длина "газовой пробки", К;  $\mu_{\text{см}}$  — молекулярная масса смеси (из водорода и азота), которая в соответствии со стехиометрией уравнения (2) равна:

$$\mu_{\text{см}} = \frac{3}{4} \mu_{\text{H}_2} + \frac{1}{4} \mu_{\text{N}_2}. \quad (13)$$

Длину зоны НКГ или "газовой пробки" находим по формуле:

$$L_{\text{НКГ}} = \frac{V_{\text{НКГ}}}{S_{\Pi}}, \quad (14)$$

где  $L_{\text{НКГ}}$  — длина зоны НКГ в ТТ после ресурсных испытаний, м;  $V_{\text{НКГ}}$  — объем "газовой пробки", сформировавшейся в ходе ресурсных испытаний, м<sup>3</sup>;  $S_{\Pi} = \frac{\pi d_n^2}{4}$  — площадь поперечного сечения парового канала ТТ, м<sup>2</sup>.

## 2. Исходные данные и результаты расчета величины газовой выделения в ТТ при эксплуатации в штатных условиях

Для проведения расчетов по формулам (1)–(14) определяем ряд констант, используя [1–3]. В соответствии с данными [1] выход стабильных продуктов радиолиза в аммиаке при воздействии  $\gamma$ -излучения и быстрых электронов приведена в табл. 1

Таблица 1

**Выход стабильных продуктов радиолиза в аммиаке при воздействии  $\gamma$ -излучения и быстрых электронов**

| Состояние вещества                  | Продукт радиолиза        | Выход продуктов — $G_{i,j}$<br>Молекул/100 эВ |
|-------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------|
| Аммиак — NH <sub>3</sub> (газ)      | Водород — H <sub>2</sub> | 4,8                                           |
|                                     | Азот — N <sub>2</sub>    | 1,6                                           |
| Аммиак — NH <sub>3</sub> (жидкость) | Водород — H <sub>2</sub> | 0,61                                          |
|                                     | Азот — N <sub>2</sub>    | 0,11                                          |

В [2] при анализе ресурсных испытаний ТТ из алюминиевого сплава с аксиальными канавками получены следующие константы: мольная энергия активации реакции термохимического разложения аммиака  $E_A = 7 \cdot 10^4$  Дж/моль; предэкспоненциальный множитель уравнения Аррениуса  $k_0 = 2,3 \cdot 10^{-2}$  с<sup>-1</sup>. При расчете величины поглощенной дозы радиации на назначенный ресурс работы ТТ 5 лет принято допущение о равномерности дозовой нагрузки в течение всего срока эксплуатации в составе КА.

Суммарная доза поглощения аммиака в ТТ (с учетом массовой защиты стенки ТТ толщиной 0,125 см из алюминиевого сплава АД31 с плотностью  $\rho = 2,71$  г/см<sup>3</sup>) составит за 5 лет пребывания на орбите следующие величины:

- Протонное излучение единого радиационного пояса Земли (ЕРПЗ) — 29,8 Гр;
- Электронное излучение ЕРПЗ — 72,7 Гр;
- Протонное излучение солнечных космических лучей (СКЛ) — 54,0 Гр.

В итоге общая доза излучения составит:

$$D_0 = 156,5 \text{ Гр} = 156,5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = 97,81 \cdot 10^{19} \frac{\text{Эв}}{\text{кг}} = 0,978 \cdot 10^{16} \frac{100 \text{Эв}}{\text{г}}.$$

Для расчета величину дозы излучения берем с коэффициентом запаса  $f = 10$ :

$$D = 10 \cdot D_0 = 9,78 \cdot 10^{16} \frac{100 \text{Эв}}{\text{г}}.$$

В расчетах использованы ТТ стандартного алюминиевого профиля АС КРА7.5-Р1 с  $\Omega$ -образными канавками со следующими параметрами (при температуре  $t = 20^\circ\text{C}$ ):

- Оптимальная заправка на погонный метр длины (по данным ФГУП "Исследовательский центр имени М.В.Келдыша", г.Москва) составляет  $m_\Sigma = 18,9$  грамм;
- Внутренний диаметр парового канала  $d_y = 7,5$  мм;
- Площадь сечения парового канала  $S = 44,15$  мм<sup>2</sup>;
- Длина трубы  $L = 1$  м (для других значений длины зона  $L_{\text{нкг}}$  увеличивается пропорционально длине);
- Плотность газообразного аммиака  $\rho_g = 6,7 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>;
- Масса газообразного аммиака  $m_g = V_g \rho_g \approx 0,3$  г;
- Масса жидкого аммиака  $m_{\text{жк}} = m_\Sigma - m_g = 18,9 - 0,3 = 18,6$  г;
- Температура хранения  $T_{\text{хр}} = 298 \pm 10$  К;
- Время хранения  $\tau_{\text{хр}} = 7$  лет ( $2,205 \cdot 10^8$  с);
- Температура в полете  $T_{\text{пол}} = 273 \pm 10$  К;
- Время в полете  $\tau_{\text{пол}} = 5$  лет ( $1,575 \cdot 10^8$  с);
- Начальная суммарная концентрация НКГ в аммиаке равна  $5 \cdot 10^{-5}\%$  в соответствии с ТУ2114-005-16422443-2003 [3]; за малостью этой величиной в расчете пренебрегаем.

Результаты расчета в соответствии с приведенными исходными данными сведены в табл. 2.

Таким образом, длина "газовой пробки" НКГ, образовавшейся в ТТ в процессе эксплуатации под влиянием термических и радиационных факторов, достаточно точно может быть определена теоретически или экспериментально (по температурному полю). Она значительно меньше заданной по техническому заданию (10 мм), но зависит от длины ТТ.

Таблица 2

## Результаты расчета суммарной дозы поглощения аммиака в ТТ

| Процесс                                                 | Длительность периода, с | Средняя температура, К | Поглощенная аммиаком доза радиации, Гр | Масса образующихся НКГ, г | Объем "газовой пробки", мм <sup>3</sup> (при $t = -40^\circ\text{C}$ ) | Длина "газовой пробки", мм (при $t = -40^\circ\text{C}$ ) |
|---------------------------------------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Термическое разложение при хранении в наземных условиях | $2,205 \cdot 10^8$      | 298                    | 0                                      | $51,0 \cdot 10^{-6}$      | 116,2                                                                  | 2,6                                                       |
| Термическое разложение в полете                         | $1,575 \cdot 10^8$      | 273                    | 0                                      | $2,75 \cdot 10^{-6}$      | 6,3                                                                    | 0,15                                                      |
| Радиолиз                                                |                         |                        | 156,5                                  | $15,7 \cdot 10^{-6}$      | 35,7                                                                   | 0,8                                                       |
| Суммарное значение                                      |                         |                        |                                        | $69,45 \cdot 10^{-6}$     | 158,2                                                                  | 3,55                                                      |

Испытаниям в лаборатории подвергались ТТ различных типоразмеров 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 ТТ изменялась от 700 до 2457 мм. Масса заправленного в ТТ из профиля АС-КРА7.5-Р1-30 аммиака особой чистоты  $\approx 40$  г. при 30% избытке, а при 10% избытке  $\approx 34$  г. (по расчету  $\approx 31$  г.). Максимальная мощность ТТ до 260 Вт. При подводимой тепловой мощности, равной 15 Вт и температуре тепловых труб в транспортной зоне  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  перепад температур по длине труб менее  $1^\circ\text{C}$ , а при мощности 20 Вт —  $2^\circ\text{C}$ . Максимальная мощность отдельной ТТ из профиля АС-КРА7.5-Р1-30 (120) позволяет создать конструкцию крупного радиатора (охладителя) или ТТТ, обладающего большой мощностью в промышленном масштабе. Таким образом, испытываемые ТТ обладают низким термическим сопротивлением, не превышающим  $\approx 0,066^\circ\text{C}/\text{Вт}$  и, следовательно, высокой тепловой проводимостью.

Экспериментальному исследованию подвергались криволинейные тепловые трубы из алюминиевого профиля типа АС-КРА7.5-Р1 с шириной полки 30 мм, с высотой — 14 мм и длиной  $L = 1762$  мм по дуге, с радиусом изгиба  $R = 1000$  мм, массой 0,63 кг.

Тепловые трубы устанавливаются вертикально, нагревателем вниз. ТТ теплоизолировались по всей длине слоями термоплекса и поролон толщиной не менее 40 мм. Управление нагревателем с сопротивлением  $R = 20$  Ом и длиной  $L = 600$  мм осуществлялось при помощи линейных источников питания постоянного напряжения АИП Б5.30/10, которые имеют высокие показатели стабильности и низкий уровень шумов и пульсаций и автоматическую двухскоростную систему охлаждения. Измерение и регистрация температуры по длине ТТ осуществлялось универсальными измерительными потенциометрами Р4833.

В горизонтальном положении трубы работали как традиционные тепловые (под действием капиллярных сил), а в вертикальном положении (испаритель внизу) — как двухфазные термосифоны (под действием гравитационных сил).

Положительный наклон относительно горизонта (включая и вертикальное положение ТТ) в процессе определения НКГ выбирается для исключения возможности осушения капиллярной структуры и влияния избытка теплоносителя на характеристики ТТ. При горизонтальном расположении избыток жидкого теплоно-

сителя (~10%), как и НКГ, вытесняется давлением насыщенного пара в конец зоны конденсации. При вертикальном расположении избыток жидкости сконцентрирован внизу ТТ в виде "лужи" и никак не влияет на газовыделение НКГ вверх.

Ускорение процессов деградации теплотехнических характеристик ТТ достигается за счет их функционирования при повышенной температуре. Браковочным признаком является увеличение длины заблокированной неконденсирующимся газом зоны ТТ выше допустимой величины или не герметичность ТТ вследствие протекания коррозионных процессов.

В начале ресурсных испытаний ТТ обладают постоянной проводимостью, а по мере увеличения длительности испытаний и накопления НКГ в конце зоны конденсации (когда длина зоны НКГ может занимать часть участка активной конденсации паров аммиака) — переменной проводимостью.

Проведены теплофизические испытания по контролю основного параметра на тепловых трубах в количестве 12 шт.

Результаты проверки теплотехнических характеристик ТТ при подводимой мощности  $Q = 20$  Вт на начальной стадии КДИ в нормальных климатических условиях № чертежа 14Ф137.8996А-0, партия П15003 сведены в табл. 3.

Таблица 3

**Основные осредненные технологические характеристики партии ТТ при подводимой мощности  $Q = 20$  Вт на начальной стадии КД в нормальных климатических условиях**

| № ТТ  | Тепловая проводимость, Вт/К | Термическое сопротивление, К/Вт | Коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К) | Удельное термическое сопротивление, (м <sup>2</sup> ·К)/Вт | Перепад температуры, °С |
|-------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 31–34 | 48,96                       | 0,0204                          | 318208,815                                        | $3,1426 \cdot 10^{-6}$                                     | 0,4                     |

Результаты проверки теплотехнических характеристик ТТ при подводимой мощности  $Q = 20$  Вт ТТ после воздействия повышенной температуры, воздействия циклического изменения температуры среды (кол-во циклов 15) и повышенной влажности № чертежа 14Ф137.8996А-0, партия П15003 сведены в табл. 4.

Таблица 4

**Основные осредненные характеристики партии ТТ при подводимой мощности  $Q = 20$  Вт после воздействия повышенной температуры, воздействия циклического изменения температуры среды и повышенной влажности**

| № ТТ  | Тепловая проводимость, Вт/К | Термическое сопротивление, К/Вт | Коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К) | Удельное термическое сопротивление, (м <sup>2</sup> ·К)/Вт | Перепад температуры, °С |
|-------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 31–34 | 49,175                      | 0,0203                          | 319608,735                                        | $3,1288 \cdot 10^{-6}$                                     | 0,4                     |

Результаты проверки теплотехнических характеристик ТТ при подводимой мощности  $Q = 15$  Вт ТТ на начальной стадии в нормальных климатических условиях № чертежа 14Ф137.8974-0, партия Ж15002 показаны в табл. 5.

Результаты проверки теплотехнических характеристик ТТ при подводимой мощности  $Q = 15$  Вт ТТ после воздействия повышенной температуры, воз-

Таблица 5

**Основные осредненные технологические характеристики партии ТТ при подводимой мощности 15 Вт на начальной стадии в нормальных климатических условиях**

| № ТТ           | Тепловая проводимость, Вт/К | Термическое сопротивление, К/Вт | Коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К) | Удельное термическое сопротивление, (м <sup>2</sup> ·К)/Вт | Перепад температуры, °С |
|----------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 03, 34, 47, 65 | 30,763                      | 0,03312                         | 203121,88                                         | $5,0015 \cdot 10^{-6}$                                     | 0,5                     |

действия циклического изменения температуры (кол-во циклов 20) № чертежа 14Ф137.8974-0, партия Ж15002 сведены в табл. 6.

Таблица 6

**Основные осредненные технологические характеристики партии ТТ при подводимой мощности  $Q = 15$  Вт после воздействия повышенной температуры, воздействия циклического изменения температуры (количество циклов 20)**

| № ТТ           | Тепловая проводимость, Вт/К | Термическое сопротивление, К/Вт | Коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К) | Удельное термическое сопротивление, (м <sup>2</sup> ·К)/Вт | Перепад температуры, °С |
|----------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 03, 34, 47, 65 | 28,608                      | 0,0371                          | 185932,0                                          | $5,6521 \cdot 10^{-6}$                                     | 0,56                    |

Результаты проверки теплотехнических характеристик ТТ при подводимой мощности  $Q = 15$  Вт после испытаний по обнаружению резонансов конструктивных элементов, испытаний на прочность при воздействии синусоидальной вибрации одной частоты, транспортировочных нагрузок, испытаний на прочность и устойчивость при воздействии синусоидальных вибраций, механических ударов, линейных ускорений № чертежа 14Ф137.8974-0, партия Ж15002 сведены в табл. 7.

Таблица 7

**Основные осредненные технологические характеристики партий ТТ при подводимой мощности  $Q = 15$  Вт после испытаний по обнаружению резонансов конструкционных элементов, испытаний на прочность при воздействии синусоидальной вибрационной части, транспортировочных нагрузок, испытаний на прочность и устойчивость при воздействии синусоидальных вибраций, механических ударов, линейных ускорений**

| № ТТ       | Тепловая проводимость, Вт/К | Термическое сопротивление, К/Вт | Коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К) | Удельное термическое сопротивление, (м <sup>2</sup> ·К)/Вт | Перепад температуры, °С |
|------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 34, 47, 65 | 38,361                      | 0,027                           | 224944,75                                         | $4,67426 \cdot 10^{-6}$                                    | 0,405                   |

Проведены непрерывные испытания на безотказность в процессе длительного функционирования (ресурсные испытания в течение 768 часов и специальные испытания в течение 1232 часов) для всех типоразмеров и конфигураций ТТ изделия в общем объеме более 6 000 часов (9,5 месяцев). При проведении ресурсных испытаний было промоделировано накопление НКГ в ТТ при 5 годах на орбите

и 7 годах хранения ( $T_{\text{полета}} = 273 \pm 10$  К, хранения  $298 \pm 10$  К). Температура проведения ресурсных испытаний ТТ 14Ф137.8974-0, 14Ф137.8996А-0, 14Ф137.8999А-0 поддерживалась равной  $85 \pm 2$  °С. Все ТТ полностью соответствуют КД, приняты БТК цеха 2141, представителем заказчика 5 ВП, что подтверждено протоколами испытаний и паспортом.

Основные теплотехнические характеристики ТТ после отработки 971 часа при температуре  $85 \pm 2$  °С в вертикальном положении, в условиях горизонтального положения при установившемся тепловом режиме при  $Q = 15$  Вт и температуре окружающей среды 18 °С, температуры в зонах испарения и конденсации соответствовали:  $T_1 = 24,22 \div 24,39$  °С,  $T_2 = 23,68 \div 23,88$  °С, перепад по длине ТТ  $\Delta T = 0,51 \div 0,54$  °С, тепловая проводимость  $kF = \frac{Q}{\Delta T} = 27,78 \div 29,41$  Вт/К, термическое сопротивление  $R = \frac{\Delta T}{Q} = 0,036 \div 0,034$  К/Вт, а коэффициент теплопередачи  $k = \frac{Q}{F\Delta T} = 180554 \div 191148$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Коэффициент теплопередачи в ТТ высок и имеет порядок  $\approx 2 \cdot 10^5$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

После отработки 1210 часов основные теплотехнические характеристики ТТ сохранились практически в указанных диапазонах. Трубы из профиля АС-КРА7.5-Р1 с омегообразной канавчатой структурой фитиля отличаются высокой тепловой проводимостью и весьма низким термическим сопротивлением.

### 3. Обсуждение результатов

Разработаны технологические основы изготовления и испытаний ТТ и крупногабаритных конструкций на ТТ. Новизна описанных новых конструктивно-технологических решений подтверждена и защищена авторскими свидетельствами и патентами на изобретения России.

Результатом работы явилось создание партий штатных ТТ различных типов-размеров и конфигурации с оптимальными теплотехническими, массовыми и габаритными характеристиками, методы их проектирования, технологии их изготовления, методики и программы испытаний, эксплуатации на пилотных изделиях "Персона".

На основе результатов исследования и разработок, практических рекомендаций обеспечивается постановка ОКР и ОТР по созданию новых более совершенных по массогабаритным энергетическим характеристикам конструкций тепловых труб как базовых элементов крупногабаритных конструкций корпусов телескопа (высотой до 6 м и диаметром 2 м и более), радиаторов-охладителей (длиной до 3 м), уточнена технология их изготовления, методы, способы и технические средства для проведения тепловых испытаний (ПСИ, КДИ, ПИ), скорректированы методики и программы испытаний, точность и надежность изделий.

Высокая эффективная эквивалентная теплопроводность, небольшие габариты и масса унифицированных ТТ из алюминиевых облегченных профилей с омегообразной структурой конструкционного фитиля АС-КРА 7,5-Р1-120-0,9/0 является экономической предпосылкой для разработки крупногабаритных конструкций с оптимальными массо-, габаритноэнергетическими характеристиками. Использование ТТ на изделии "Персона" позволяет обеспечить на 20–40% меньшие массогабаритные характеристики крупногабаритных конструкций КА, чем у традиционно

применяемых радиаторов, теплообменников и термоплат с жидкостной прокачкой однофазного теплоносителя.

Как показывают расчеты, при использовании радиаторов на ТТ по сравнению с радиатором коллекторного типа, его габариты уменьшаются в  $\sim 1,5$  раза, а масса полезного груза КА увеличивается за счет значительного снижения массы радиатора на величину  $\Delta M = \Delta M = (160,2 - 66,375) \text{ кг} = 93,825 \text{ кг} \approx 94 \text{ кг}$ , а с учетом снижения массы заправки теплоносителем ( $M_3 = 29,3 \text{ кг}$ ) получим величину  $\Delta M_{\text{ит}} \approx 117,9 \text{ кг}$ . Реальная цена на мировом рынке единицы массы космического радиатора — 16500 долл/кг, а полезного груза свыше 30000 долл./кг.

Общая прибыль может составить — 157341077 руб. Например, при полной стоимости коммерческого спутника 100 млн. долларов (8 лет работы) экономия от применения (увеличивает массу полезной нагрузки  $\approx 94 \text{ кг}$ ) достигает 6 млн. долларов при норме дисконтирования  $E = 0,12$ .

Выполнены разработки с ФГУП ГНП РКЦ "ЦСКБ-Прогресс" по проектированию, изготовлению, по методам испытаний партии тепловых труб, включая ресурсные (1100 часов), которые используются на российском спутнике дистанционного зондирования Земли "Ресурс-ДК" (выведен в космос 15 июня 2006 г. ракетой-носителем "Союз-У"). В состав КА "Ресурс-ДК", входит научно-исследовательская аппаратура "Памела" и "Ариана", разработанные соответственно Институтом ядерной физики Римского университета (Италия) и институтом космофизики МИФИ.

Изображение поверхности Земли (более 22 млн. км<sup>2</sup>), переданное российским спутником дистанционного зондирования Земли "Ресурс-ДК" подтверждают работоспособность бортовых систем, в т.ч. СТР (с использованием партий тепловых труб) и целевой аппаратуры и наглядно демонстрируют масштабы успеха отечественных разработчиков.

Как показывает анализ результатов летных испытаний конструкций тепловых труб при эксплуатации спутника "Ресурс-ДК", они вполне конкурентоспособны по сравнению с разработками NASA, ESA, Китая.

## Заключение

Разработаны научные, конструктивно-технологические принципы проектирования и технологии изготовления и испытаний ТТ постоянной и переменной проводимости, в том числе тонкостенных конструкций, сборки-сварки СТР на ТТ, гарантирующие надежность и высокое качество при эксплуатации.

Выполнение программы исследований на различных этапах проектирования позволяют получить основные принципы построения и способы формирования элементарно-агрегатной базы сложных высокоэффективных СОТР для КА нового поколения. На основе сформулированных принципов проектирования элементов СОТР КА разработаны методы и технические средства реализации теоретических и экспериментальных исследований двухфазных базовых элементов СТР крупногабаритных оболочек (колец) телескопа и платформы; разработаны и внедрены новая технология изготовления и современные средства и методы испытаний ТТ различных типоразмеров и конфигураций.

Обобщение результатов экспериментального моделирования на основе комплексов теплофизических параметров позволяет прогнозировать точность и ресурс базовых двухфазных элементов ТТ СТР и уточнить принципы их построения.

Практическое использование специальных технологий проектирования и испытания ТТ позволило решить вопросы организации заводского производства и ком-

плексных испытаний ТТ специальных крупногабаритных конструкций с целью повышения эксплуатационной надежности изделий космической техники и ее конкурентоспособности.

НАОКР отличается многоэтапностью и технической сложностью выполнения: модели, программы, методики, техническая документация по разработке их оптимальных конструкций и технологии изготовления, разработка программ и методик, методов, способов и технических средств, испытания (ПСИ, КДИ, ПИ.) ТТ различных типоразмеров и конфигураций, теплопередающих устройств на основе ТТ, адаптация разработки конструкций к сопряженным тепловыделяющим приборам и агрегатам, обобщение результатов испытаний и корректировка конструкторско-технологической документации, передачу уточненной технической документации заказчику.

На изделие "Персона" использовано 454 ТТ различных типоразмеров и конфигураций при изготовлении крупногабаритных термоплат, радиаторов-охладителей, корпуса телескопа. Результаты НАОКР и ОТР (модели, методики, техническая документация, экспериментальные ТТ) используются на макетах, ЭУ, на летных изделиях "Персона".

Предложенные методы теплофизического, математического моделирования, инженерного проектирования и разработка технологий изготовления и испытаний базовых элементов СТР КА создали предпосылки по применению результатов прикладных исследований для термостатирования крупногабаритных оболочек и термоплат и других объектов. Создание новых высокоэффективных специальных конструкций СТР на ТТ для отечественных изделий позволит решать новые задачи их применения в интересах министерства обороны, МЧС, Минатома, ЖКХ и других министерств и ведомств [4–10].

Результаты работы носят межотраслевой характер. Это обеспечит их применение в машиностроительной, нефтяной, газовой отраслях, в автомобилестроении. Разработки являются базовым заделом для других инновационных проектов: для охлаждения центральных процессоров нового поколения в компьютерной технике, для проектирования теплообменников-утилизаторов, отопительных радиаторов на ТТ, теплообменных аппаратов на ТТ для конденсации паров прямогонного бензина, систем с возобновляемыми источниками энергии на ТТ.

## Литература

- [1] Пикаев, А.К. Современная радиационная химия. Радиолит газов и жидкостей / А.К. Пикаев. – М., Наука, 1986. – 262 с.
- [2] Barantsevich, V. Development and Testing of Pipes Used for Thermal Control of ISS Solar Battery Drive / V. Barantsevich, V. Shabalkin // Heat Pipes Science Technology Application. Proceeding of the 12 International Heat Pipes Conference Russia 2002. – P. 270
- [3] ТУ2114-005-16422443-2003. Аммиак жидкий особой чистоты.
- [4] Лукс, А.Л. Анализ концепции применения тепловых труб и их основных характеристик при формировании модулей космического аппарата / А.Л. Лукс // Сборник тезисов докладов III Международной научно-технической конференции "Физика и технические приложения волновых процессов", 6–12 сентября 2004 г., Волгоград.
- [5] Лукс А.Л. Разработка теплообменников на тепловых трубах для использования низкопотенциальных ресурсов в жилищно-коммунальном хозяйстве и

- на промышленных предприятиях / А.Л. Лукс, А.Г. Матвеев // Сборник трудов региональной научно-методической конференции (18–20 октября 2005 г.) "Актуальные проблемы многоуровневого высшего профессионального образования". – Самара, 2005. – С. 265–269.
- [6] Лукс, А.Л. Разработка системы терморегулирования на двухфазных тепловых трубах корпуса телескопа космического летательного аппарата / А.Л. Лукс, А.Г. Матвеев // Тезисы докладов конференции "Проблемы фундаментальной физики XXI века". – Самара, 2005. – С. 45–47.
- [7] Шур, В.Л. Исследование температурного поля радиаторов из оребренных тепловых труб / В.Л. Шур, А.Л. Лукс, Е.Ю. Лемперт // Известия ВУЗов. Авиационная техника. – Казань. №4. – 1991. – С. 84–88.
- [8] Лукс, А.Л. Выбор оптимальных геометрических параметров системы утилизации тепла двигателя внутреннего сгорания / А.Л. Лукс, Ю.Н. Шишкин, А.И. Сорокин // Известия ВУЗов. Машиностроение. – М., 1992. – №1–3. – С. 75–78.
- [9] Безопасность жизнедеятельности. Книга 4. Ч.П. Оценка надежности и работоспособности нефтегазо-химического оборудования. Методы расчета / Я.С. Амиров [и др.]. – Уфа, УГНТУ, 1998. – 374 с.
- [10] Авт. свидетельство СССР "Устройство для отвода тепла" № 1622736 Бюл. № 3, опубл. 21.01.1991. Авт. свидетельство СССР "Тепловые трубы" № 1673823. – Бюл. № 32, опубл. 30.08.1991 г.

Поступила в редакцию 31/V/2007;  
в окончательном варианте — 31/V/2007.

## HIGH-EFFICIENT AMMONIAC HEAT-PIPES WITHIN ENERGY-EFFICIENT SYSTEMS FOR TEMPERATURE CONTROL OF LARGE DIMENSION CONSTRUCTIONS OF SPACECRAFT<sup>3</sup>

© 2007 A.L. Luks, A.G. Matveev<sup>4</sup>

In the paper an experimental study that is carried out according to agreement with FGUP GNP RKTs "TsSKB-PROGRESS" is presented. This test program includes operational-development and resource tests and is carried out for high-efficient heat-pipes, which utilize light type AS-KPA 7,5-R1-120/0, TU 550.1-02070921.007-03 of aluminum alloy AD31 of Russian standard GOST 4784-74 and GOST-22233-93 of alloys 6060, 6061, 6063 of US standard AMS 4116. Thermal and physical characteristics of heat-pipes (temperature field, temperature difference, heat conduction and temperature lag) for different types, sizes and configurations (rectilinear and curvilinear) as base element of systems for temperature control of large dimension constructions of spacecraft (radiators and refrigerants, telescope module) are discussed.

Paper received 31/V/2007.

Paper accepted 31/V/2007.

<sup>3</sup>Communicated by Dr. Sci. (Phys. & Math.) Y.N. Radayev.

<sup>4</sup>Luks Alexandr Leonidovich, Matveev Andrey Grigor'evich, Dept. of Research Activities, Samara State University, Samara, 443011, Russia.