

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АГРЕГАТОВ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ТЕПЛА В КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

В. В. Двирный¹, Г. Г. Крушенко^{2,3}, В. В. Голованова⁴,

Г. В. Двирный¹, Н. Н. Петяева¹, К. А. Кирьянова¹

¹АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»,
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

²Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск, Российская Федерация

³Сибирский государственный аэрокосмический университет
имени академика М. Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Российская Федерация

⁴ФГУП КБ «Арсенал» им. М. В. Фрунзе, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассматривается период создания агрегатов транспортировки тепла в космических аппаратах с 70-х годов прошлого века и по настоящее время. В процессе развития космической техники связи, навигации и геодезии создавались многочисленные типы космических аппаратов с различными видами систем терморегулирования и агрегатов транспортировки тепла при общей тенденции повышения потребляемой мощности и тепловыделений, наращивания количества тепловых связей и повышения эффективности распределения тепла, увеличения срока активного существования до 15 лет. Облик современных космических аппаратов во многом определяет выбор систем терморегулирования и агрегатов транспортировки тепла, а в случае бесконтейнерного варианта при разработке блочно-модульной структуры космического аппарата, сопотанели и топология тепловых труб в них является основополагающим фактором, требующим решения сложных прикладных теплофизических задач. Также рассматривается проблема передачи и распределения многочисленных тепловых потоков, которую решают агрегаты транспортировки тепла, обеспечивая при этом требуемый диапазон температур газа в герметичном контейнере. Освещено обеспечение длительного ресурса малорасходных нагнетателей космического аппарата агрегатов транспортировки тепла жидкости как решение наиболее наукоемкой задачи для быстровращающихся роторов электронасосных агрегатов.

Ключевые слова: транспортировка тепла, космические аппараты, тепловые трубы, газорегулируемые тепловые трубы, система терморегулирования, электронасосные агрегаты, малорасходные вентиляторы.

Введение

Космический аппарат (КА) представляет собой замкнутую автономную теплоэнергетическую систему, в которой выделяется внутренний стационарный тепловой поток от многочисленных источников, расположенных внутри гермоконтейнера или снаружи. Извне подводится наружный переменный тепловой поток, зависящий от положения на орбите, и сам объект сбрасывает избыточное тепло в окружающее пространство излучением или расходом массы вещества. Например, вну-

три гермоконтейнера спутника связи типа «Галс», созданного в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» еще в прошлом веке, в различных четвертях на приборной раме расположены следующие наиболее теплонагруженные приборы: аккумуляторная батарея, выделяющая в режимах разряд (участки «тени» на стационарной орбите) – заряд 200 Вт тепла; блок автоматизации и стабилизации, выделяющий 200 Вт тепла; система преобразования и управления двигателями установки коррекции, выделяющая 250 Вт тепла; бортовая цифровая вычислительная машина, выделяющая 160 Вт тепла; контрольно-измерительная система, выделяющая 80 Вт тепла, и другие. Снаружи гермоконтейнера на астроблоке наибольшее количество тепла вы-

деляют лампы бегущей волны в блоке ретранслятора, который в сумме выделяет 1250 Вт тепла. Аналогичные тепловыделяющие приборы установлены в гермоконтейнере КА «Горизонт» [1].

Проблему передачи и распределения многочисленных тепловых потоков решают АТТ, обеспечивая при этом требуемый диапазон температур газа в герметичном контейнере 0–40 °С, газа на выходе в комплект аккумуляторных батарей 0–35 °С, жидкостного теплоносителя на входе в гидравлический тракт бортового радиотехнического комплекса 5–37 °С, а также температурных режимов внешних элементов и систем в орбитальных условиях в течение времени активного существования 5–10 лет, и совместно с наземными средствами термостатирования при электрических испытаниях на заводе-изготовителе, электрических проверках на техническом комплексе и подготовке к пуску на стартовом комплексе.

Поэтому очень важной проблемой на всех этапах разработки и эксплуатации КА является проблема определения его температурных полей, создаваемых потоками теплоносителей агрегатов транспортировки тепла (АТТ).

Решением задач по различным АТТ занимались научные сотрудники и инженеры, работающие в самых различных областях науки и техники, поэтому до настоящего времени еще не сложилось единого понимания назначения и функционального содержания СТР и АТТ, а что касается последних, то нет общепринятой терминологии. Первые попытки обобщения АТТ предприняты в 1995 и 1996 годы [2; 3].

На международной научно-технической конференции в 1994 году В. В. Двирным был предложен термин АТТ и впервые сформулирована связанная с их созданием крупная научная проблема в качестве нового перспективного направления в области теплофизики и молекулярной физики, имеющего важное народно-хозяйственное значение при разработке КА, заключающееся в создании высокоресурсных и высокоэффективных конструкций, передающих максимальные потоки тепла и распределяющих эти потоки по заданной логике работы [4]. При уровнях внутренних тепловых нагрузок 4–6 кВт в КА разработки АО «ИСС» типа «Галс», «Горизонт» и др. применялись активные газожидкостные СТР, представляющие собой совокупность АТТ, таких как малорасходные вентиляторы (МВ) для создания искусственного конвективного теплообмена в условиях невесомости внутри гермоконтейнера, электронасосные агрегаты (ЭНА) для транспортного жидкого теплоносителя на наружный радиатор-излучатель, распределительно-регулирующие агрегаты (РРА) для управления тепловыми потоками газов и жидкостей, капиллярные нагнетатели – тепловые трубы (ТТ), в которых

реализован испарительно-конденсационный цикл передачи тепловых потоков и др.

Во всех АТТ, кроме тех, где изменяется агрегатное состояние вещества, тепломассообмен происходит при движении газов и жидкостей, которые было предложено рассматривать как сплошные среды, поскольку, например, в газах КА при давлениях, сравнимых с атмосферными, число молекул в 1 см³ равно $2,7 \cdot 10^{19}$, а длина свободного пробега молекул порядка 10^{-5} см. Поэтому всякий малый элемент объема газа или жидкости, то есть теплоносителя, считается большим по сравнению с длиной свободного пробега молекул и межмолекулярными расстояниями. Известно, что температура теплоносителей определяется кинетической энергией молекул, при этом действительные мгновенные значения скоростей потока теплоносителя в данной точке АТТ суть некоторые средние скорости движения группы молекул, то есть скорости центра инерции молекул, находящихся в физически бесконечно малом объеме. Наличием движения молекул в теплоносителях АТТ обусловлены внутреннее трение и теплопроводность.

Эти предпосылки были использованы при разработке АТТ в дальнейшем. На современном уровне развития космической техники в АО «ИСС» создан, например, телекоммуникационный КА «Экспресс-АМ8» [5], который успешно был запущен на геостационарную орбиту 14 сентября 2015 года [2]. КА создан на базе спутниковой платформы среднего класса «Экспресс-1000 НТВ», которая обеспечивает мощность электропитания, выделяемого на полезную нагрузку 5 800 Вт [6].

На КА «SESAT» хорошо зарекомендовал себя АТТ жидкости ЭНА – электронасосный агрегат и другие АТТ, которые непрерывно проработали в орбитальных условиях 16 лет и работают по настоящее время.

Обеспечение длительного ресурса малорасходных нагнетателей КА АТТ жидкости освещено в работе как решение наиболее наукоемкой задачи для быстровращающихся ($n = 6\,000$ об/мин) роторов ЭНА [4]. При этом большое значение придается предотвращению негативных последствий дисбаланса вращающихся масс [11].

Показаны АТТ, наиболее эффективные для различных энергетических систем КА, в том числе являющиеся элементами теплотоники: теплопровод – тепловая труба (ТТ), термодиод и термотриод. Для решения теплофизических проблем при создании ТТ были решены проблемы совместности рабочей жидкости и корпуса, их очистки, контроля неприлегания фитиля, тепловых испытаний по снятию основных теплопередающих характеристик, гибки, заправки, термостарения, приработки и др. с привлечением таких научных

центров, как МЭИ, КуАи, КИЦМ, ОТИ ПП и др., завода КРАМЗ.

Разработаны первые в отрасли аммиачные нерегулируемые ТТ для спутников типа «Горизонт» и впервые в стране газорегулируемые ТТ для спутников типа «Луч», «Смолсат» и «Гонец». Удельная теплопроводность ТТ примерно в 500 раз больше, чем у серебра и меди.

Тепловые трубы применяются в настоящее время практически на всех спутниках разработки АО «ИСС», а проекты перспективных спутников в бесконтейнерном варианте основаны на применении легких сотовых панелей с алюминиевыми ТТ [8].

Применение запатентованных турбулизаторов позволило в три раза повысить интенсивность теплообмена. Приведены характеристики ТТ и поперечные сечения ТТ из прессованного алюминиевого профиля. Благодаря высокой точности и специальной геометрии разработанные ТТ конкурируют по теплопередающим характеристикам с ресурсом с ТТ NASA США из профиля фирмы «Minalex». Газорегулируемые ТТ подтвердили свои характеристики в составе спутника типа «Луч» и превосходят аналогичные характеристики ТТ французских спутников «SIGMA». При тех же передаваемых максимальных и минимальных тепловых потоках объем баллона ТТ АО «ИСС» в 2,3 раза меньше.

Высокие теплотехнические характеристики разработанных ТТ подтверждены в результате теоретических и экспериментальных исследований, наземной и летной отработки, а также безотказной эксплуатации КА в составе девяти космических систем. Итоги работ по ТТ доложены на международных конференциях [9; 10].

Выбор ТТ, определение их характеристик с обеспечением требуемой надежности при возможно минимальной массе, задание топологии ТТ по панели, определение оптимальных характеристик СТР в процессе разработки КА требуют большого объема вычислений.

Дано научное обоснование и усовершенствован метод элементарных тепловых балансов А. П. Ваничева для расчета температурных полей применительно к термостатированным панелям КА сотовой конструкции.

Описание процессов теплопередачи в методе Ваничева изначально производится с помощью системы алгебраических уравнений путем составления балансов тепла для малых объемов (узлов), на которые разбивается вся система физических тел, участвующих в теплообмене рассматриваемой задачи.

Вывод уравнений основан на том, что всякое изменение внутренней энергии узла приводит к изменению температуры. Особенностью ТТ является то, что большая эквивалентная теплопроводность предопределена фазовым превращением рабочего тела, происходящим при большой температуре, в чем выражается основная трудность применения

метода А. П. Ваничева, поскольку противоречит физической сути, отражаемой системой его уравнений.

Определение фактических текущих расходов пара и жидкости в фитиле ТТ при решении комплексной задачи по теплопередаче весьма проблематично как с точки зрения точности их определения, так и с точки зрения сложности совместного решения системы уравнений движущейся жидкости и пара с уравнениями баланса тепла для конструкции ТТ и устройства в целом. Предложен более простой метод, основанный на допущении, что баланс тепла произвольного участка ТТ, включающего в себя элемент конструкции ТТ с канавками, заполненными рабочей жидкостью, складывается из тепла, подведенного теплопроводностью в осевом и окружном направлениях, конвекцией от движущегося жидкого теплоносителя, и тепла за счет фазового перехода на границе жидкость – пар.

При составлении баланса тепла рассматриваемого элементарного участка ТТ сделано допущение, что тепло, отведенное с поверхности испарения, пропорционально эффективной проводимости насыщенного рабочей жидкостью фитиля и разности температур участка и температуры насыщения пара. Температура насыщения пара принята равной средней температуре расчетных участков ТТ, соприкасающихся с паровым каналом. Это автоматически исключает появление ложных стоков тепла. При этом предположено, что тепло, ушедшее с участков через границу жидкость-пар, мгновенно перераспределяется между участками с более низкой температурой, эквивалентная теплопроводность парового канала бесконечна. Таким образом, симитировано основное свойство ТТ – стремление к выравниванию температур участков ТТ с большой эквивалентной теплопроводностью с помощью перемещения очень малых масс вещества. При составлении баланса считается, что теплосодержание и масса участка за счет движущейся жидкости не меняются и ТТ работает в режиме испарения. Справедливость всех принятых допущений подтверждена экспериментальным исследованием сотовой панели с ТТ. Составлена система уравнений теплового баланса для произвольного участка ТТ.

Система уравнений по физической сути аналогична системе уравнений А. П. Ваничева. При определении теплового потока через границу пар-жидкость необходимо в качестве температуры участка ТТ подставить температуру насыщенного пара, а вместо теплопроводности участка ТТ эффективную теплопроводность насыщенного рабочей жидкостью фитиля, вычисленную по известным в теории ТТ формулам.

Таким образом, система уравнений моделирует основные свойства ТТ – стремление к выравниванию температуры с помощью больших значений эквивалентной теплопроводности, доста-

точно в исходных данных задать нулевое значение эффективной теплопроводности фитиля. ТТ при этом работает как обычный конструктивный элемент панели.

По предлагаемой методике были проведены расчеты теплового режима экспериментальной панели сотовой конструкции с ТТ после проведения тепловакуумных испытаний. Результаты расчета показали хорошую сходимость с результатами эксперимента, в пределах 2 °С.

Выводы

В период с 70-х годов прошлого столетия по настоящее время АТТ для КА прошли усовершенствование на ресурс непрерывной работы в орби-

тальных условиях с 3 лет до 5 лет, 7 лет, 10 лет и 15 лет в составе КА: «Галс», «Горизонт», «Экран», «Радуга», «Гео – ИК», «Луч», «Экспресс АМ1», «Экспресс АМ5», «Экспресс АМ6», «Экспресс АМ8», «Глонасс М», «Глонасс К», «SESAT», «AMOS» и др.

Наиболее наукоемким при совершенствовании АТТ было доведение быстровращающихся роторов ЭНА до 15 лет непрерывной работы на шарикоподшипниковых опорах.

Разработаны нерегулируемые, газорегулируемые и встраиваемые в сотовую панель ТТ КА.

Список литературы

1. Gilmore D. G. (Ed.) *Spacecraft Thermal Control Handbook. Volume 1: Fundamental Technologies*. 2 edition // American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), Reston, Virginia, 2002. 836 p.
2. Двирный В. В., Краев М. В. Малорасходные автономные нагнетатели. Красноярск : Изд-во Краснояр. ун-та, 1985. 152 с.
3. Головенкин Е. Н., Двирный В. В., Ковалев Н. А. и др. Агрегаты автономных энергетических систем : учеб. пособие / под ред. К. Г. Смирнова-Васильева. Красноярск : КрПИ, 1986. 89 с.
4. Двирный В. В. Теория и практика агрегатов для транспортировки тепла в космических аппаратах с длительным сроком активного существования // Проблемы обеспечения качества изделий в машиностроении : материалы Международной научно-технической конференции. Красноярск : КГПУ, 1994. С. 402–406.
5. Чайкина И., Кармакова М., Щербакова Ю. «Экспресс-АМ8» – новый спутник для российской орбитальной группировки // Сибирский спутник. 2015. № 4 (377). С. 1.
6. Чайкина И., Кармакова М., Щербакова Ю. Оперативно и без замечаний // Сибирский спутник. 2015. № 18 (391). С. 1.
7. Тестоедов Н. А., Двирный Г. В., Туркенич Р. П. и др. Испарительно-конденсационные устройства для применения в робототехнике и космической технике // Материалы II научно-практической конференции «Робототехника как образовательная технология». Железногорск : филиал СФУ, 2011. С. 49.
8. Тестоедов Н. А., Двирный Г. В., Голованова В. В. Космические технологии агрегатов транспортировки тепла с изменением агрегатного состояния // Труды X Международной научно-практической конференции «Интеллект и наука». Железногорск : филиал СФУ, 2010. С. 3–6.
9. Двирный В. В., Смирнов-Васильев К. Г., Панов Г. И. и др. Моделирование характеристик тепловых труб при расчете нестационарных температурных полей конструкции с тепловыми трубами // Проблемы обеспечения качества изделий в машиностроении : материалы Международной научно-технической конференции. Красноярск : КГПУ, 1994. С. 462–468.
10. Двирный В. В., Майданик Ю. Ф., Пастухов В. Г. и др. Развитие аналитических и экспериментальных исследований контурных тепловых труб // Материалы 7-й Международной конференции по тепловым трубам. Минск : Институт теплообмена имени А. В. Лыкова, 1990. С. 55–59.
11. Крушенко Г. Г., Голованова В. В. Балансировка некоторых агрегатов космических аппаратов // Вестник СибГАУ. 2014. № 3. С. 178–184.

IMPROVEMENT UNITS FOR TRANSPORTING HEAT IN A SPACECRAFT

V. V. Dvirnyi¹, G. G. Krushenko^{2,3}, V. V. Golovanova⁴, G. V. Dvirnyi¹,
N. N. Petyaeva¹, K. A. Kiryanova¹

¹JCS «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems», Zheleznogorsk, Russian Federation

²Institute Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation

³Reshetnev Siberian State Aerospace University, Krasnoyarsk, Russian Federation

⁴The Arsenal Design Bureau named after M. V. Frunze, Saint-Petersburg, Russian Federation

This paper covers creation period of units for transporting heat in a spacecraft from the 70-s of the last century to the present time. In the development of space technology communication, navigation and geodesy were created numerous types of spacecrafts with various types of thermal control systems and units for transporting heat while the general trend of increasing power consumption and heat dissipation, increasing the number of thermal couplings and improve the efficiency of heat distribution, increasing active shelf life up to 15 years. The appearance of modern spacecraft largely determines the choice of thermal systems and units for transporting heat and in the case of containerless option when developing a block-modular spacecraft structure, honeycomb and topology of the heat pipes are fundamental, requiring solutions of complex applied thermal problems. Also this paper covers the problem of multiple heat flows transmission and distribution, which solve the units for transporting heat, while providing the required range of gas temperature in a sealed container. This paper presents long life ensure of low consumption blowers in a spacecraft of units for transporting heat liquid in service, as a solution of the most science-intensive task for the rapidly rotating rotor of electric pump units.

Key words: transporting heat, spacecrafts, heat pipes, gas-controlled heat pipes, thermal control system, electric pump unit, low consumption fan.

References

1. David G. Gilmore. Fundamental Technologies. Spacecraft Thermal Control Handbook, 2002. Vol. I. 836 p.
2. Dvirnyi V. V., Kraev M. V. Low consumption self-contained blowers. Krasnoyarsk: Univ Publ., 1985. 152 c.
3. Golovenkin E. N., Dvirnyj V. V., Kovalev N. A., Kraev M. V. pod red. K. G. Smirnova-Vasil'eva, Agregaty avtonomnykh ehnergeticheskikh system [Units of self-contained power systems]. Krasnoyarsk: KrPi., Publ., 1986. 89 c.
4. Dvirnyj V. V. Theory and practice of units for transporting heat in the spacecraft with a long active life. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Problemy obespecheniya kachestva izdelij v mashinostroenii» [Problems of maintenance of product quality in mechanical engineering]. KGPU. Krasnoyarsk, 1994. P. 402–406. (In Russ.)
5. Chajkina I., Karmakova M., Shherbakova Y. «Express AM8» – a new satellite for the Russian orbital group] // Sibirskiy sputnik. 2015. Vol. 16, N. 4. P. 1. (In Russ.)
6. Chajkina I., Karmakova M., Shherbakova Y. Promptly, and without comment // Sibirskiy sputnik. 2015. Vol. 19, No. 18. P. 1. (In Russ.)
7. Testoedov N. A., Dvirnyi G. V., Turkenich R. P. Evaporation-condensation device for use in robotics and space technology. Materialy II nauchno-prakticheskoy konferentsii 'Robototekhnika kak obrazovatel'naya tekhnologiya' [Robotics as an educational technology]. Filial SFU, Zheleznogorsk, 2011. P. 49. (In Russ.)
8. Testoedov N. A., Dvirnyj G. V., Golovanova V. V. [Space technologies of heat transporting units with change of unit state]. Trudy X nauchno-prakticheskoy konferentsii «Intellektinaynaya» [Intelligence and science]. Filial SFU, Zheleznogorsk, 28–29 th April, 2011. P. 3–6 (In Russ.).
9. Dvirnyj V. V., Smirnov-Vasil'ev K. G., Panov G. I., Ovechkin G. I. [Modeling of heat pipes characteristics in the calculation of non-stationary temperature field structure with heat pipes]. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Problemy obespecheniya kachestva izdelij v mashinostroenii» [Problems of maintenance of product quality in mechanical engineering]. KGPU. Krasnoyarsk, 1994. P. 462–468. (In Russ.)
10. Dvirnyj V. V., Majdanik YU. F., Pastukhov V. G. [Development of analytical and experimental studies of loop heat pipes]. Materialy 7 Mezhdunarodnoj nauchnoy konferentsii 'teplovye trubi' [Heat pipes]. Institut teplomassoobmena im. A. V. Lykova, Minsk, 1990. P. 55–59. (In Russ.)
11. Krushenko G. G., Golovanova V. V. [Balancing of some spacecraft units]. Vestnik SibGAU. 2014. N. 3. P. 178–184. (In Russ.)