

УДК 629.78-533.6-716:629.785:523.9

**СИСТЕМА ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ
НЕГЕРМЕТИЧНОГО ПРИБОРНОГО ОТСЕКА
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «ИНТЕРГЕЛИОЗОНД»
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЦА С БЛИЗКИХ РАССТОЯНИЙ**

© 2018 г. Котляров Е.Ю.¹, Луженков В.В.¹, Тулин Д.В.¹, Басов А.А.²

¹Научно-производственное объединение имени С.А. Лавочкина (НПО Лавочкина)
Ул. Ленинградская, 24, г. Химки, Московская обл., Российская Федерация, 141402,
e-mail: npol@laspace.ru

²Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия»)
Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация, 141070,
e-mail: post@rsce.ru

Рассматриваются особенности теплового режима негерметичного приборного отсека космического аппарата «Интергелиозонд», разрабатываемого НПО Лавочкина по заданию Госкорпорации «Роскосмос». Дается краткое описание космического аппарата, приводятся необходимые библиографические ссылки. В рамках программы «Интергелиозонд» создаются два одинаковых космических аппарата, которые будут производить физические исследования Солнца с близких расстояний, функционируя на гелиоцентрических внеэллиптических орбитах. Принимая во внимание условия применения космического аппарата, характеризующиеся значительным изменением плотности падающего солнечного излучения, в его состав предлагается ввести сегмент на базе гидроконтур в дополнение к уже имеющейся основной системе обеспечения терморегулирования, построенной на базе тепловых труб и сопанелей. Гидроконтур выполняет роль универсальной системы, которая обеспечивает температурный режим на этапах наземной отработки, а в период летной эксплуатации способна осуществлять теплоснабжение или дополнительное охлаждение приборного отсека. Представлен многовариантный, отличающийся более высоким уровнем сложности, процесс внедрения гидроконтур в состав системы обеспечения терморегулирования приборного отсека космического аппарата.

Ключевые слова: гидроконтур, система обеспечения теплового режима, космический аппарат, тепловые трубы, наземная отработка, универсальная система, тепловой кластер.

**THERMAL CONTROL SYSTEM
OF THE UNPRESSURIZED INSTRUMENT COMPARTMENT
FOR INTERGELIOZOND SPACECRAFT INTENDED
FOR SOLAR RESEARCH AT CLOSE DISTANCES**

Kotlyarov E.Yu.¹, Luzhenkov V.V.¹, Tulin D.V.¹, Basov A.A.²

¹Lavochkin Association
24 Leningradskaya str., Khimki, Moscow region, 141002, Russian Federation,
e-mail: npol@laspace.ru

²S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia)
4A Lenin str., Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation, *e-mail: post@rsce.ru*

Consideration is given to specifics of thermal control of the unpressurized instrument compartment of the Intergeliozond spacecraft developed by Lavochkin Association by the order of Roscosmos State Corporation. Brief description of the spacecraft and relevant bibliographic references are given. Two identical spacecraft will be developed under the Intergeliozond program, which will perform physical research of the Sun at close distances operating in heliocentric non-ecliptic orbits. Taking into account the conditions of the spacecraft operation characterized by a significant change of the incoming solar radiation density, a pumped fluid loop-based segment is proposed to be introduced in addition to the existing basic TCS based on heat pipes and honeycomb panels. The pumped fluid loop fulfills the function of a general-purpose system, which ensures temperature conditions in the ground developmental test phases, and during the flight operation, and is capable of ensuring a heat supply or additional cooling of the instrument compartment. A multiple-option process characterized by a level of complexity of the fluid loop integration into TCS of the instrument compartment of the spacecraft is presented.

Key words: pumped fluid loop, thermal control system, spacecraft, heat pipes, ground developmental test, general-purpose system, thermal cluster.



КОТЛЯРОВ Е.Ю.



ЛУЖЕНКОВ В.В.



ТУЛИН Д.В.



БАСОВ А.А.

КОТЛЯРОВ Евгений Юрьевич — ведущий математик НПО Лавочкина, e-mail: key@laspace.ru
KOTLYAROV Evgeny Yuryevich — Lead mathematician at Lavochkin Association, e-mail: key@laspace.ru

ЛУЖЕНКОВ Виталий Васильевич — начальник отдела НПО Лавочкина, e-mail: npol@laspace.ru
LUZHENKOV Vitaly Vasilyevich — Head of Department at Lavochkin Association, e-mail: npol@laspace.ru

ТУЛИН Дмитрий Владимирович — заместитель начальника комплекса НПО Лавочкина, e-mail: tulin@laspace.ru
TULIN Dmitry Vladimirovich — Deputy Head of Complex at Lavochkin Association, e-mail: tulin@laspace.ru

БАСОВ Андрей Александрович — начальник отделения «РКК «Энергия», e-mail: abasov@rsce.ru
BASOV Andrey Aleksandrovich — Head of Division at RSC Energia, e-mail: abasov@rsce.ru

Введение

В настоящее время ведущие космические агентства, в частности, NASA, ESA и Роскосмос, осуществляют конструкторские разработки и производство космических аппаратов (КА), предназначенных

для проведения физических исследований Солнца с близких расстояний [1–3]. В российской космической программе подобного рода исследования планируется проводить в рамках программы «Интергелиозонд» (ИГЗ) с помощью двух КА, работающих на гелиоцентрических внеэклиптических

орбитах. Научные приборы, которые будут установлены на данных КА, проведут серию различных физических измерений с высокой чувствительностью и разрешением, в т.ч., в оптическом, ультрафиолетовом, рентгеновском и гамма-диапазонах [4].

Уникальной особенностью космических аппаратов, предназначенных для работы в окрестностях Солнца, является способность их конструкции и установленного оборудования функционировать в условиях мощного солнечного излучения и циклического изменения его величины. По оценкам авторов, для российских КА плотность падающего солнечного потока может достигать в перигелии значения $17,5 \text{ кВт/м}^2$, а в афелии понижаться до $0,95 \text{ кВт/м}^2$. В статье обсуждаются технические решения, обеспечивающие заданный температурный режим негерметичного приборного отсека (ПО) КА ИГЗ, разработку которого осуществляет НПО Лавочкина.

Система обеспечения терморегулирования приборного отсека

Рассмотрим, как построена концепция обеспечения теплового режима КА ИГЗ. На рис. 1 показано, что космический зонд оснащен теплозащитным экраном (ТЭ), состоящим из двух дисков, а также шпангоутов, скрепляющих их. Указанные элементы ТЭ выполнены из углерод-углеродного композиционного материала, устойчивого к воздействию высоких температур, которые могут достигать на внешней части экрана свыше $\sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$. ТЭ способен создавать необходимую тень на КА при его ориентации осью X на Солнце.

Панели солнечных батарей (СБ) не попадают в тень экрана и должны функционировать на любых участках орбиты. Конструкция и внешнее покрытие СБ целенаправленно адаптированы к повышенным температурам, а выбор углового положения панелей в процессе полета КА позволяет изменять их температуру заданным образом. Принципиальные технические решения, касающиеся организации работы СБ в рассматриваемых условиях, изложены в работе [5].

Корпус КА, находящийся в тени экрана, собран из тепловых сотопанелей (ТСП), которые образуют негерметичный ПО, имеющий форму правильной восьмигранной призмы. Внутри ТСП встроены

тепловые трубы (ТТ). Восемь больших ТСП ($\sim 660 \times 1770 \text{ мм}$) образуют основную часть отсека, а восемь малых ($\sim 660 \times 470 \text{ мм}$) — дополнительную часть. Последняя является корпусом/каркасом для размещения двигательной установки с топливными баками (рис. 1).

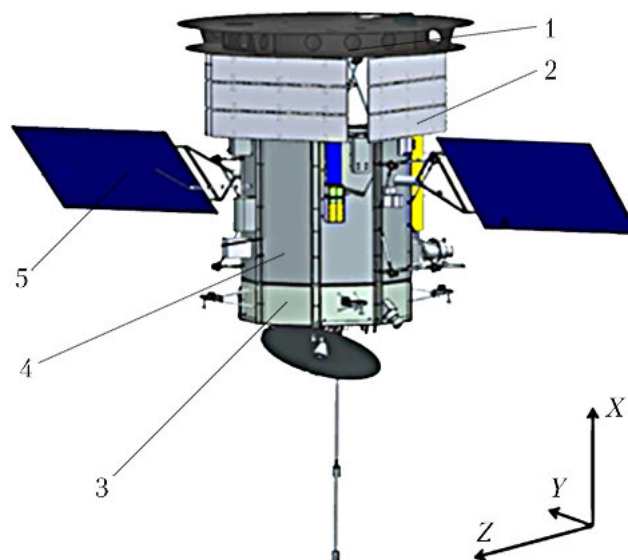


Рис. 1. Внешний вид КА «Интергелиозонд»: 1 — защитный тепловой экран; 2 — радиаторы; 3 — дополнительная часть приборного отсека; 4 — основная часть отсека; 5 — панели солнечных батарей

Тепловыделяющее оборудование устанавливается на ТСП с двух сторон и закрывается экранно-вакуумной теплоизоляцией (ЭВТИ). Дозируемый сброс избыточного тепла в окружающую среду обеспечивается с помощью теплопроводов радиаторов, сконструированных на базе регулируемых контурных тепловых труб (КТТ). ТСП основной части ПО соединены попарно с помощью коллекторных ТТ, что позволяет распределить блоки оборудования и приборов в две отдельные группы, по температурным диапазонам, соответственно, $-20 \dots +60 \text{ }^\circ\text{C}$ и $0 \dots +35 \text{ }^\circ\text{C}$.

Рис. 2 показывает, каким образом организовано соединение теплопередающих агрегатов в основной и дополнительной частях ПО, а именно: между ТСП, коллекторными ТТ и радиационными теплообменниками (РТО).

Для того чтобы обеспечить комфортный температурный режим оборудования, установленного на ТСП, система терморегулирования ПО оснащена несколькими РТО на базе КТТ, а кроме того, здесь имеются нерегулируемые РТО (НРТО), роль которых выполняют участки внешних поверхностей ТСП, намеренно освобожденные от ЭВТИ и имеющие покрытие

с высокой излучательной способностью ε . Нерегулируемые РТО позволяют отводить тепло «по месту», снижая температурные градиенты по ТСП, между ТСП и по теплоотводящим трактам.

Собственное энергопотребление КА составляет ~1 кВт, однако определение параметров РТО системы обеспечения терморегулирования (СОТР) выполнено с запасом, с учетом воздействия внешних потоков на излучающие поверхности и теплопритоков, поступающих по элементам конструкции. В общей сложности СОТР ПО ИГЗ имеет ~6 м² излучающей поверхности на регулируемых и ~1 м² – на нерегулируемых РТО. Роль последних отчасти выполняют открытые элементы некоторых приборов, экспонированных в открытое космическое пространство и соединенных с ТСП.

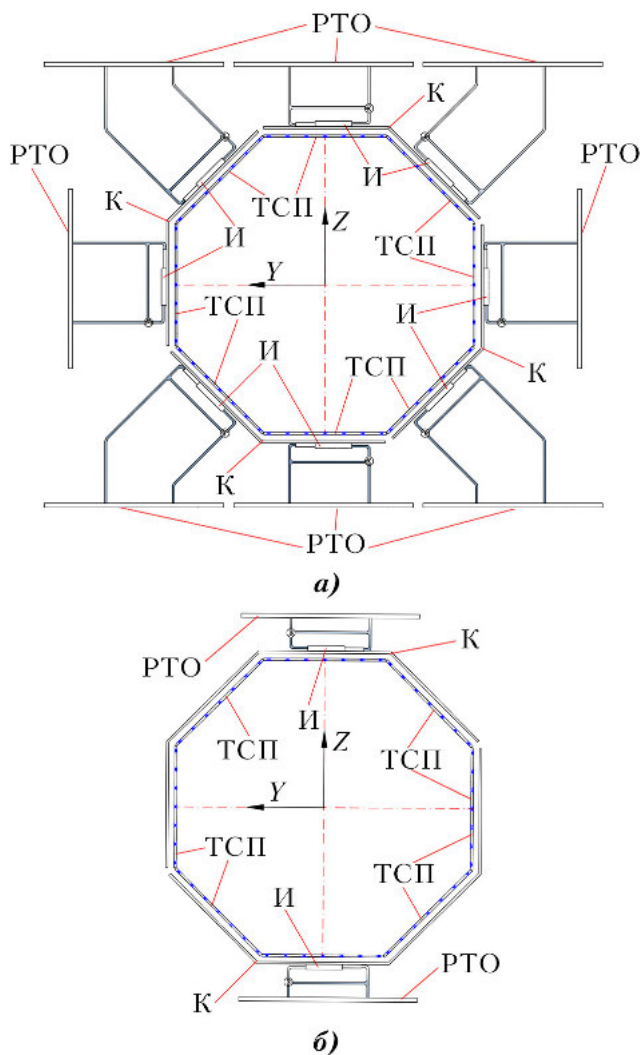


Рис. 2. Схема соединения агрегатов системы терморегулирования верхней и нижней частей приборного отсека КА «Интергелиозонд»: а – основная часть; б – дополнительная часть; И – испаритель; К – коллектор (на тепловых трубах); РТО – радиационные теплообменники; ТСП – тепловые сопанели

На рис. 3 показано, как организована схема теплового соединения двух ТСП в основной части ПО. Подобные схемы широко применяются в КА НПО Лавочкина и позволяют осуществлять перераспределение тепла, выделяемого оборудованием, а также более рационально применять РТО, НРТО, собственную теплоемкость установленных приборов и теплоемкость агрегатов СОТР для поддержания заданного температурного уровня нескольких ТСП, объединенных в своеобразные тепловые кластеры.

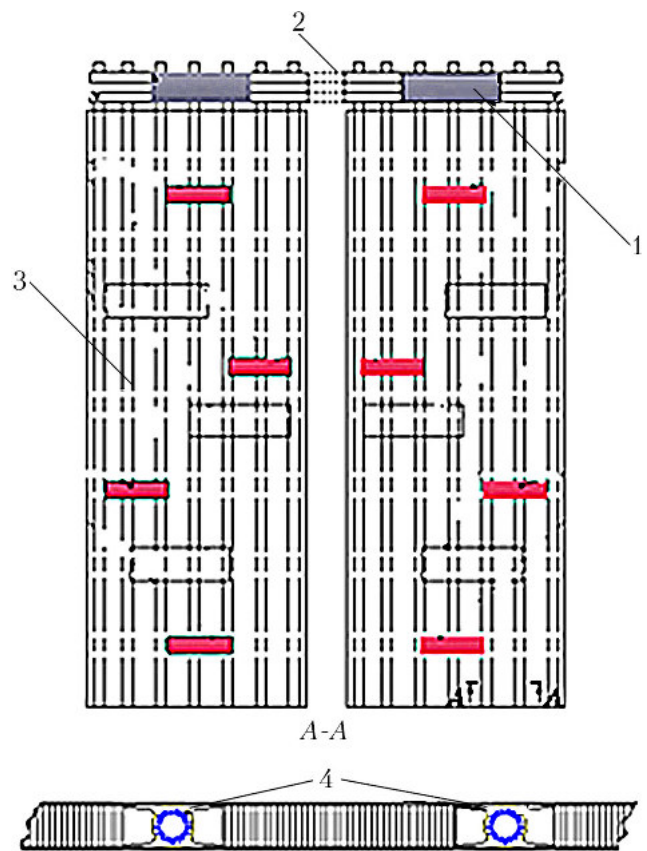


Рис. 3. Тепловой кластер из двух тепловых сопанелей (ТСП), одного коллектора и двух контурных тепловых труб (КТТ): 1 – испаритель КТТ; 2 – коллектор; 3 – ТСП; 4 – аксиальные тепловые трубы

Примечание. Радиационные теплообменники не показаны.

В теплозащитных экранах КА ИГЗ имеется несколько сквозных отверстий, через которые солнечное излучение общей мощностью до ~8 кВт поступает к объективам и сенсорным элементам научных приборов. Суммарная площадь указанных отверстий составляет не менее 0,45 м², при этом наибольшая часть (>65%) прямого солнечного излучения попадает через одно крупное отверстие на объектив многофункционального оптического телескопа «Тахомаг» [6], имеющего собственную, локальную СОТР.

Большинство научных приборов, обьективы и сенсоры которых напрямую работают с солнечным излучением, установлены на внешних сторонах ТСП, что позволяет отражать либо рассеивать за пределы ПО значительную долю поступающей солнечной энергии. При этом сквозные отверстия в ТЭ в нештатных ситуациях могут быть закрыты с помощью имеющихся аварийных шторок/заслонок. Однако, даже в случае безаварийной работы приборов можно ожидать значимого уровня паразитных теплопритоков в приборный отсек (по предварительным оценкам — до ~ 1 кВт) на этапах прохождения КА района перигелия.

Особенности применения и наземной обработки

Несмотря на то, что концепция СОТР ПО строится на достаточно отработанных и обоснованных технических решениях, специфика уникальных условий применения КА ИГЗ порождает ряд конкретных технических проблем.

Во-первых, с учетом того, что в зону приборного отсека может поступать энергия, существенно превышающая собственное энергопотребление КА, возникает потребность в наращивании потенциала СОТР, выраженного в увеличении поверхностей РТО и НРТО.

Во-вторых, при прохождении космическим аппаратом афелия можно уверенно ожидать дефицит электроэнергии, необходимой для компенсации тепловых потерь от НРТО и через ЭВТИ ПО. Такого рода компенсация обычно выполняется с помощью электронагревателей, поэтому дефицит возникает в условиях снижения местной солнечной постоянной до $\sim 0,95$ кВт/м². Аналогичная ситуация имела место при перелете КА *Messenger* к Меркурию [7].

Наконец, *в-третьих*, для этапов наземной обработки КА ИГЗ в панелях его корпуса, в которых имеются ТТ, затруднительно воспроизвести адекватное распределение температуры из-за влияния массовых сил. В частности, возникают ограничения при передаче тепла между «объединенными» ТСП, а также при отводе тепла из отдельных зон ТСП. Эти проблемы известны и связаны с тем, что ТТ, встроенные в ТСП, а также коллекторные ТТ, объединяющие ТСП и РТО (в условные тепловые кластеры),

вынуждены работать в режиме термосифона, что не обеспечивает передачу тепла по длине каждой ТТ в произвольном направлении.

При наземных испытаниях СОТР КА для создания условий функционирования ТТ, наиболее адекватно воспроизводящих их работу в условиях невесомости, в существующей практике применяется «развертка всех агрегатов в горизонт», по возможности, в одной плоскости. Таким образом добиваются необходимого перераспределения тепла в пределах одной и между несколькими объединенными в кластеры ТСП. Однако обеспечить на полностью собранном КА «горизонтальную развертку» всех тепловых труб крайне затруднительно.

Сегмент СОТР на базе гидроконтур

Для полного или частичного решения вышеперечисленных проблем предлагается дооснастить СОТР КА гидроконтуром, рассчитанным на передачу тепловой мощности ~ 1 кВт. Такой контур должен снимать тепло с каждой ТСП с помощью контактного теплообменника (термоплат) и отводить его на внешний контактный теплообменник (термоплату), к которому подключается наземная СОТР (НСОТР). Схема такого гидроконтур показана на рис. 4.

С помощью предлагаемого гидроконтур можно обеспечить выполнение различных видов наземной обработки КА в части теплового режима. Если при наземных операциях пространственное положение оси X КА в поле массовых сил будет горизонтальным, то ТТ ТСП будут работать «по всей длине», а передача тепла (знакопеременная) от ТСП к ТСП будет происходить по направлению циркуляции теплоносителя гидроконтур. При вертикальном положении оси X КА размещение термоплат должно быть в верхней части ТСП, чтобы встроенные в ТСП ТТ могли работать в режиме термосифона. При этом передача тепла будет происходить только в направлении от ТСП к гидроконтур.

С учетом того, что штатный максимальный солнечный поток в лабораторных условиях недостижим и, следовательно, паразитные теплопритоки будут не столь велики, теплопередающую способность гидроконтур для наземной обработки можно ограничить величиной ~ 1 кВт.

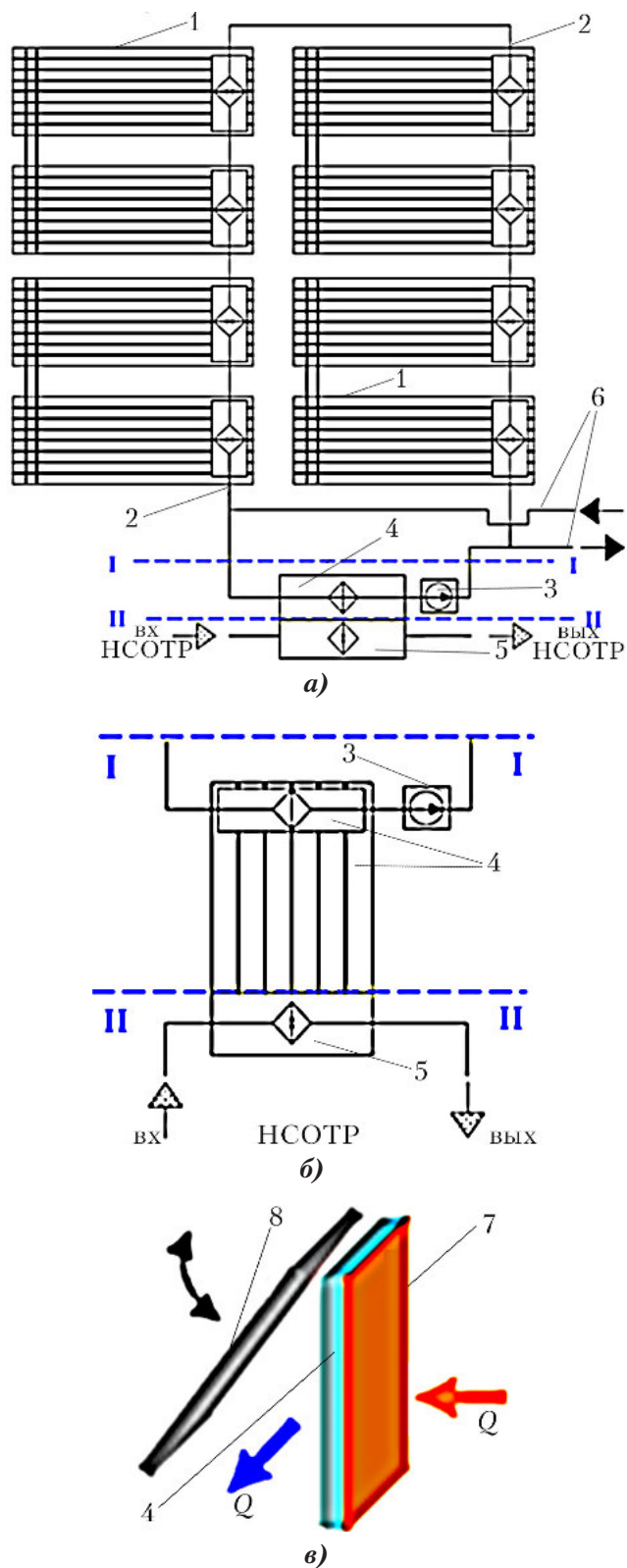


Рис. 4. Интеграция гидроконтура в систему терморегулирования приборного отсека: а – гидроконтур с контактным теплообменником для НСОТР; б – гидроконтур с теплообменником, преобразуемым в радиатор; в – применение шторки для регулирования производительности радиатора. 1 – группа ТСП основной части ПО; 2 – трубопроводы гидроконтура; 3 – электронасосный агрегат; 4 – внешний контактный теплообменник (может быть преобразован в РГО); 5 – контактный теплообменник со стороны НСОТР; 6 – параллельная ветвь гидроконтура, подключаемая к группе термоплат дополнительной части ПО; 7 – селективное покрытие; 8 – теплоизолирующая шторка

Концепция циркуляционного контура, который здесь можно рассматривать как «универсальный сегмент СОТР на базе гидроконтур», должна отвечать следующим требованиям:

- контактные теплообменники (термоплаты) гидроконтур должны быть установлены на ТСП по аналогии с коллекторными ТТ, т.е. по технологии, принятой в НПО Лавочкина: без нарушения целостности обечаек ТСП; с обеспечением эффективного теплового контакта термоплат и ТТ, встроенных в ТСП; с возможностью неоднократного монтажа термоплат на ТСП. Ширина контактных зон должна быть соизмерима с шириной коллекторных теплопроводов (т.е. не превышать 90 мм);

- гидроконтур должен осуществлять рекуперативный теплообмен с НСОТР, организованный с помощью внешнего контактного теплообменника, с целью обеспечения быстрого (и «сухого») соединения НСОТР к/от КА при выполнении различных работ, требующих термостатирования;

- гидроконтур должен быть оснащен собственным электронасосным агрегатом, имеющим независимое управление от системы управления НСОТР. Насос гидроконтура должен иметь летную квалификацию с целью возможного перспективного применения гидроконтура в составе КА в качестве сегмента летной СОТР ПО. Решение о летном статусе гидроконтура может быть принято в рабочем порядке, например, только для одного из двух КА ИГЗ.

Рис. 4, а, б показывают, как могут разделяться элементы гидроконтура для реализации различных вариантов его применения в составе СОТР ПО в зависимости от выбранного уровня сложности. По линии II система может быть разделена или собрана всякий раз, когда необходимо отсоединить или подсоединить НСОТР. Данное контактное соединение можно обеспечивать через теплопроводящую прокладку с применением резьбовых крепежных соединений (разъединение жидкостных магистралей не требуется).

По линии I гидроконтур можно разделить после завершения всех наземных видов обработки в случае, если жидкостной контур не планируется использовать для летной эксплуатации КА. Из магистралей и термоплат гидроконтура в этом

случае следует удалить теплоноситель (осушить/продуть). Вместе с электронасосным агрегатом и внешним контактным теплообменником по возможности демонтируют термоплаты ТСП.

В случае, если система на базе гидроконтра сохраняется в составе КА для расширения функциональных возможностей летной СОТР ПО (разделение по линии П), то, как показывает рис. 4, б, внешний контактный теплообменник гидроконтра может быть «преобразован» в радиатор-нагреватель. То есть, контактный теплообменник, который является тепловым интерфейсом для подключения КА к наземной СОТР, может в полете выполнять функции радиационного теплообменника-нагревателя, известного в промышленном теплоснабжении как солнечный коллектор (СК). Для выполнения функций СК наружный теплообменник должен быть снабжен селективным покрытием с характеристиками $A_s > 0,9$ и $\epsilon < 0,1$ (рис. 4, в, поз. 7). СК, имеющий рабочую поверхность $0,5 \text{ м}^2$, способен осуществлять теплоснабжение приборного отсека в афелии (т. е. в холодном режиме) мощностью не менее $\sim 400 \text{ Вт}$. В горячем режиме данное решение позволит получить соизмеримую дополнительную хладопроизводительность СОТР ПО, поскольку площадь НРТО можно пропорционально нарастить, а СК способен деактивироваться уводом в тень ТЭ.

Установка теплоизолирующей шторки 8, показанной на рис. 4, в, еще больше увеличит функциональный потенциал внешнего теплообменника гидроконтра. Из СК он может быть преобразован в дополнительный радиатор-охладитель, если на его противоположную сторону нанести терморегулирующее покрытие с высоким ϵ и открывать шторку 8, когда КА переходит в горячий режим. Площадь поверхности такого РТО, как и у СК, будет равна $0,5 \text{ м}^2$. Подвижная шторка может дополнительно служить регулятором производительности СК.

В процессе определения концепции универсальной СОТР на базе гидроконтра рассматривались варианты автоматической адаптации пространственного положения СК, а также возможность его трансформации в радиатор-охладитель из раскладываемой конструкции. Однако в технологическом плане такой путь существенно усложнит создание сегмента СОТР КА на базе гидроконтра,

значительно повысит его массу и снизит надежность, поскольку потребует использования приводов, гибких жидкостных магистралей, шарнирных конструкций, пиропатронов и т. п.

Однако, и при реализации более простого и надежного варианта летного применения гидроконтра необходимо учесть, что работа неподвижно установленного внешнего теплообменника (в роли СК) потребует переориентации пространственного положения самого КА ИГЗ всякий раз, когда СК необходимо будет приводить в активное состояние. То есть, в полетном задании должна быть предусмотрена целенаправленная переориентация КА в районе афелия, приоритетом которой является тепловой режим.

Базовые параметры и уровни внедрения гидроконтра

Для оценки базовых параметров гидроконтра и применяемых контактных теплообменников было принято, что циркуляционный насос позволяет развивать напор до $0,6 \text{ бар}$ при расходе 6 л/мин , работая с теплоносителем ПМС-1,5Р [8]. Выбор данного теплоносителя приемлемо согласуется с диапазоном температур, в котором предполагается применить гидроконтра в составе ИГЗ.

В качестве побудителя расхода теплоносителя ПМС-1,5Р в гидроконтре предполагается использовать электронасосный агрегат разработки и изготовления РКК «Энергия», подтвердивший свои характеристики при эксплуатации в составе модулей Российского сегмента Международной космической станции. Отработанные в РКК «Энергия» технические решения, такие как использование гидростатических или магнитных подшипников, а также работа в режиме широтно-импульсной модуляции, обеспечат необходимые для рассматриваемого случая ресурсные характеристики и надежность электронасосного агрегата.

Таблица демонстрирует основные параметры, которыми следует руководствоваться при конструировании контактных теплообменников для сегмента СОТР на базе гидроконтра. Термоплаты для ТСП основной части ПО должны иметь не менее 34 (параллельных) каналов, для дополнительной части — не менее 9 каналов. Рекомендуются не использовать гидравлический диаметр более 2 мм . Внешний

контактный теплообменник гидроконтур (обращенный к НСОТР) рассматривается как эквивалент четырем теплообменникам, устанавливаемым на ТСП основной части ПО.

Ламинарный режим течения в каналах контактных теплообменников позволяет иметь стабильные коэффициенты теплопередачи при отклонении значения расхода

от расчетного. Распределение расхода между ветками контура в основной и дополнительной частях ПО планируется сделать постоянным, отрегулированным одновременно. В рассмотренном примере поток жидкости распределен в пропорции 4:1 (между основным и дополнительным ПО).

Параметры, используемые при конструировании контактных теплообменников

Параметр	Значение	Примечание
Плотность ПМС-1,5Р	855 кг/м ³	ρ
Расход	6 л/мин	Суммарный
Теплоемкость ПМС-1,5Р	1 805 Дж/кг·К	C_p
Тепловая нагрузка	990 Вт	Q
Перепад температуры	6,4 К	$\Delta T = Q / (C_p \cdot G)$
Канавка – «ширина»	1,30 мм	Канавки для жидкости
Канавка – «глубина»	4,00 мм	Канавки для жидкости
Гидравлический диаметр	1,96 мм	$4F/P_{cm}$
Число Нуссельта	4,123	Nu
Теплопроводность ПМС-1,5Р	0,106 Вт/м·К	λ
Теплоотдача в каналах	223 Вт/м ²	$Nu \lambda / d$
Количество параллельных каналов	43 шт.	В двух параллельных контурах
Суммарная длина ветви	9 м	Длина циркуляционного контура
Базовое сечение трубопроводов	78,5 мм ²	Соединительные трубки
Скорость в трубопроводах	1,27 м/с	Соединительные трубки
Скорость жидкости в теплообменнике	0,45 м/с	В каналах
Вязкость ПМС-1,5Р	0,00133 Па·с	μ
Число Рейнольдса (канавки)	566	Re
Число Рейнольдса (трубопроводы)	8 189	Re
Гидропотери в каналах	44 638 Па	$\xi l / 0,5 d \rho v^2$
Суммарный коэффициент местных гидравлических сопротивлений	20	ξ
Гидропотери в местных сопротивлениях	13 875 Па	$0,5 \xi \rho v^2$

На рис. 5 показаны результаты вычислительного эксперимента, выполненного с применением 3D-модели фрагмента контактного теплообменника. Рисунок представляет 1/7 часть теплообменника единичной ТСП. Полученная проводимость всего теплообменника составляет ~16 Вт/К (для ПМС-1,5Р). С учетом полученной величины можно показать, что суммарная тепловая проводимость теплопередающего тракта на базе рассматриваемого гидроконтур составит ~45 Вт/К (от ТСП до внешнего контактного теплообменника).

Указанная тепловая проводимость позволит отводить тепловой поток из приборного отсека величиной до ~1 кВт при наземной

отработке КА, а также эффективно подводить к приборному отсеку тепловую мощность ~400 Вт в режиме теплоснабжения в процессе летной эксплуатации КА. В первом случае уровень температуры на теплообменнике наземной СОТР следует держать на ~25–35 К ниже желаемой рабочей температуры ТСП, во втором рабочая температура «солнечного коллектора» будет превышать температуру ТСП примерно на 10–15 К.

Рис. 6 схематично представляет, как сегмент СОТР на базе гидроконтур может быть внедрен (с разным уровнем сложности) в состав КА для обеспечения теплового режима приборного отсека.

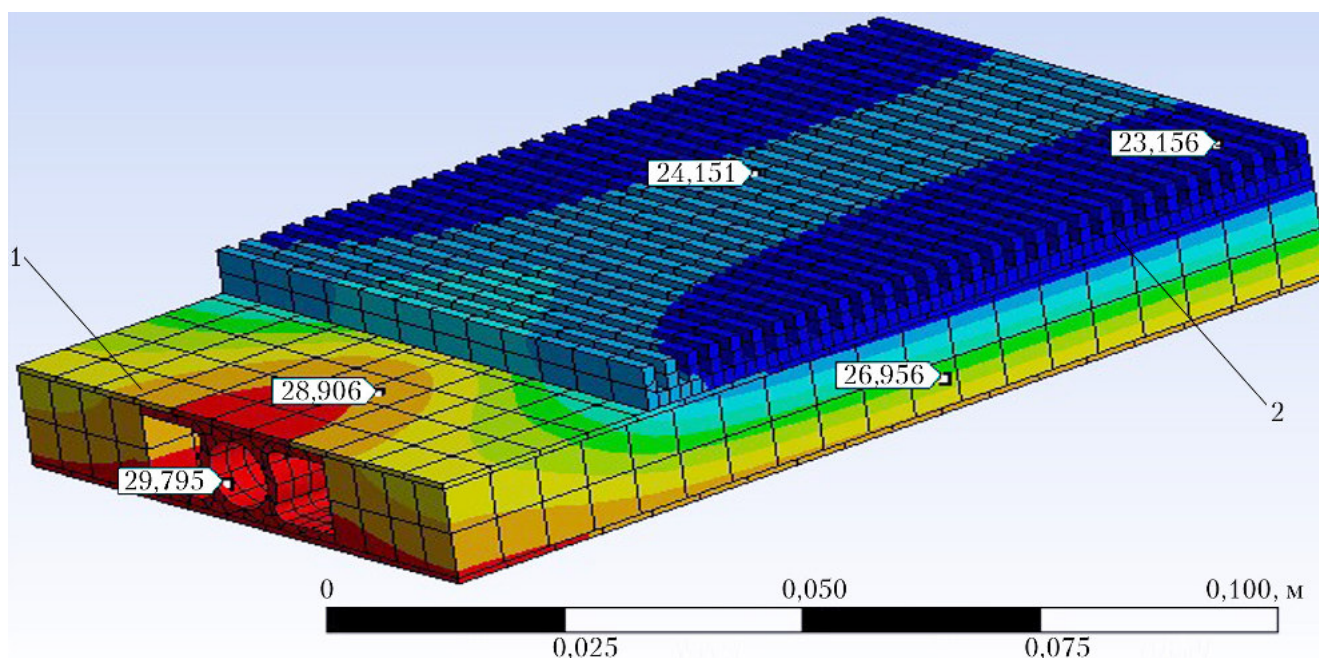


Рис. 5. Соединение контактного теплообменника с тепловой соопанелью (фрагмент, содержащий единичную тепловую трубу): 1 – часть соопанели с тепловой трубой; 2 – часть контактного теплообменника

Примечание. В выносках приведены значения температуры, °С.

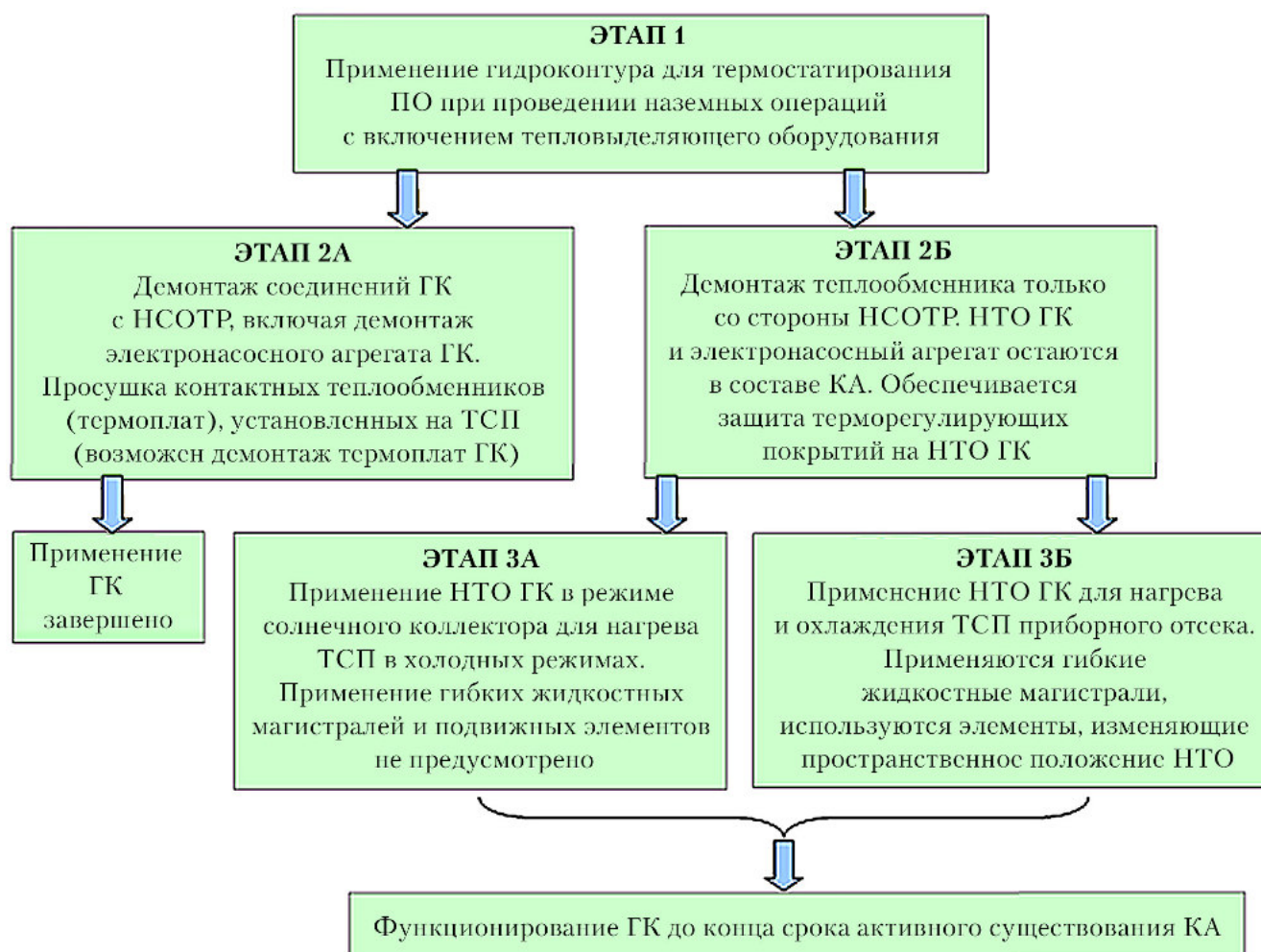


Рис. 6. Пошаговое внедрение гидроконтура (с разным уровнем сложности) в состав системы терморегулирования космического аппарата «Интергелиозонд»

Примечание. ПО – приборный отсек; ГК – гидроконтур; НСОТР – наземная система обеспечения теплового режима; ТСП – тепловые соопанели; НТО – наружный теплообменник.

Применение гидроконтра с минимальным функциональным набором позволит обеспечить только операции наземной отработки КА. Расширенный пакет функций предусматривает трансформацию внешнего теплообменника гидроконтра в горячий и/или холодный радиатор и открывает возможность применения гидроконтра на этапе полета КА.

Выводы

Предлагаемая концепция универсального сегмента СОТР на базе гидроконтра позволит существенно расширить возможности обеспечения теплового режима КА ИГЗ.

Применение гидроконтра только для наземных операций отработки КА предусматривает демонтаж электронасосного агрегата и внешнего теплообменника, подключаемого к НСОТР, по завершении работ. Создание условий работоспособности штатных радиационных теплообменников и нерегулируемых радиационных теплообменников (в поле массовых сил) при использовании гидроконтра не требуется. Предпочтительная ориентация КА — горизонтальная, однако, и для вертикальной ориентации КА гидроконтр способен обеспечить необходимый температурный режим тепловыделяющего оборудования.

Расширенный пакет функциональных возможностей гидроконтра позволит обеспечить теплоснабжение ПО КА в полете при возникновении дефицита электроэнергии. При необходимости циркуляционный контур может быть преобразован из системы теплоснабжения в резервную систему отвода тепла или использован для интенсификации теплообмена между ТСП. Летный вариант гидроконтра подразумевает несъемные электронасосный агрегат и наружный теплообменник, которые имеют летную квалификацию.

Особую ценность могут представлять летные данные по эксплуатационным характеристикам основных элементов гидроконтра, поскольку условия применения КА ИГЗ несомненно являются условиями беспрецедентного технологического эксперимента.

Список литературы

1. *Solar orbiter exploring the Sun-heliosphere connection // Definition study report, ESA/SRE(2011), 14 July 2011. 118 p.*

2. *Solar Probe + mission engineering study report // Prepared for NASA's Heliophysics Division by the Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, March 2008. 146 p.*

3. Платов И.В., Симонов А.В., Константинов М.С. Особенности разработки комбинированной двигательной установки и схемы полета космического аппарата «Интергелиозонд» // Вестник Сибирского Государственного аэрокосмического университета им. М.Ф. Решетнева. 2015. Т. 16. № 1. С. 198–206.

4. Кузнецов В.Д. Научные задачи проекта «Интергелиозонд» / Труды рабочего совещания по проекту «Интергелиозонд». Таруса, 11–13 мая 2011 г. // Механика, управление и информатика. М.: ИКИ РАН, 2012. С. 5–14.

5. Финченко В.С., Устинов С.Н., Луженков В.В., Котляров Е.Ю., Еремин И.В., Тырышкин И.М. К вопросу об изменении углового положения панели СБ с целью обеспечения ее теплового режима, применительно к КА «Интергелиозонд» // Тепловые процессы в технике. 2014. № 7. С. 308–316.

6. Обридко В.Н., Кожеватов И.Е., Руденчик Е.А., Куликова Е.Х., Кузнецов В.Д. Многофункциональный оптический телескоп «Тахомаг». Общее описание / Труды рабочего совещания по проекту «Интергелиозонд». Таруса, 11–13 мая 2011 г. // Механика, управление и информатика. М.: ИКИ РАН, 2012. С. 21–26.

7. Ercol C.J. *The MESSENGER spacecraft power system: thermal performance through Mercury Flyby 3 // AIAA 2010-6848, 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 25–28 July 2010, Nashville, TN. 16 p.*

8. Морковин А.В., Плотников А.Д., Борисенко Т.Б. Теплоносители для тепловых труб и наружных гидравлических контуров систем терморегулирования автоматических и пилотируемых космических аппаратов // Космическая техника и технологии. 2015. № 3(10). С. 89–99.

Статья поступила в редакцию 15.05.2018 г.

Reference

1. *Solar orbiter exploring the Sun-heliosphere connection. Definition study report, ESA/SRE (2011), 14 July 2011. 118 p.*
2. *Solar Probe+ mission engineering study report. Prepared for NASA's Heliophysics Division by the Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, March 2008. 146 p.*
3. *Platov I.V., Simonov A.V., Konstantinov M.S. Osobennosti razrabotki kombinirovannoy dvigatel'noy ustanovki i skhemy poleta kosmicheskogo apparata «Intergel'iozond» [Features of the development of the combined propulsion system and the flight profile of the Intergel'iozond spacecraft]. Vestnik Sibirskogo Gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. M.F. Reshetneva, 2015, vol. 16, no. 1, pp. 198–206.*
4. *Kuznetsov V.D. Nauchnye zadachi proekta «Intergel'iozond» [Scientific tasks of Intergel'iozond project]. Proceedings of the working meeting for Intergel'iozond project. Tarusa, 11–13 May 2011. Mekhanika, upravlenie i informatika. Moscow, IKI RAN publ., 2012. Pp. 5–14.*
5. *Finchenko V.S., Ustinov S.N., Luzhenkov V.V., Kotlyarov E.Yu., Eremin I.V., Tyryshkin I.M. K voprosu ob izmenenii uglovogo polozeniya paneli SB s tsel'yu obespecheniya ee teplovogo rezhima, primenitel'no k KA «Intergel'iozond» [On the issue of changing the angular position of SA panel to assure its thermal mode as applied to Intergel'iozond SC]. Teplovye protsessy v tekhnike, 2014, no. 7, pp. 308–316.*
6. *Obridko V.N., Kozhevator I.E., Rudenchik E.A., Kulikova E.Kh., Kuznetsov V.D. Mnogofunktsional'nyy opticheskiy teleskop «Takhomag». Obshchee opisanie [Multifunctional optical telescope Takhomag. General Description]. Proceedings of the working meeting for Intergel'iozond project. Tarusa, 11–13 May 2011. Mekhanika, upravlenie i informatika. Moscow, IKI RAN publ., 2012. Pp. 21–26.*
7. *Ercol C.J. The MESSENGER spacecraft power system: thermal performance through Mercury Flyby 3. AIAA 2010-6848, 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 25–28 July 2010, Nashville, TN. 16 p.*
8. *Morkovin A.V., Plotnikov A.D., Borisenko T.B. Teplonositeli dlya teplovykh trub i naruzhnykh gidravlicheskiykh konturov sistem termoregulirovaniya avtomaticheskikh i pilotiruemykh kosmicheskikh apparatov [Heat transfer medium for heat pipes and external hydraulic circuits of thermal control systems of unmanned and manned spacecraft]. Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii, 2015, no. 3(10), pp. 89–99.*