Пути снижения термоупругих деформаций приборов звёздной ориентации

Г.А. Аванесов, Р.В. Бессонов, Н.Н. Брысин, А.С. Квашнин, В.Е. Шевелев

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: aquaservice.ru@gmail.com

В современных космических аппаратах ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения требуется точная система определения ориентации углового положения в пространстве. Основным инструментом, позволяющим определить высокоточную ориентацию, являются звёздные датчики. Один из видов погрешностей приборов звёздной ориентации вызван термоупругими деформациями. Выявление причины термоупругих деформаций связано с определением источников тепловой энергии, накаливаемой конструкцией в условиях орбитального полёта. В статье приведены причины возникновения таких деформаций и их влияние на угловые повороты прибора. Приведены данные натурной эксплуатации приборов и расчётных моделей. Анализ тепловых режимов и термоупругих деформаций проведён расчётным путём с использованием метода конечных элементов (МКЭ). МКЭ позволяет производить множество расчётов, необходимых для поиска оптимального решения с минимальными термоупругими деформациями прибора. Описана методика расчёта данных деформаций и оценка угловых перемещений. Проанализированы подходы к построению термостабильных конструкций приборов: выбор материалов с необходимыми физическими свойствами, конструкторских решений, создание условий для минимизации влияния условий эксплуатации. Отмечены преимущества и недостатки каждого подхода. Предлагаемые меры по снижению термоупругих деформаций необходимо применять как в конструкции прибора звёздной ориентации, так и космического аппарата и его целевой аппаратуры.

Ключевые слова: прибор звёздной ориентации (звёздный датчик), солнечная радиация, термоупругие деформации, коэффициент температурного расширения (КТР), теплопроводность, термостабильность

> Одобрена к печати: 23.11.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-90-105

Введение

Тенденция развития современных космических аппаратов (КА) со съёмочной аппаратурой высокого и сверхвысокого разрешения предусматривает точную систему определения ориентации в инерциальной системе координат. Один из видов погрешностей приборов звёздной ориентации вызван термоупругими деформациями.

При анализе ошибок, вызванных термоупругими деформациями, целесообразно рассматривать КА в целом, так как в конечном счёте речь идёт об изменении ориентации приборов звёздной ориентации относительно целевой аппаратуры КА. Кроме того, термоупругие деформации во многом определяются системой терморегулирования КА. На практике периодические изменения взаимной ориентации между приборами трудно поддаются калибровке и в результате могут вносить определяющий вклад в совокупную ошибку измерений ориентации бортовой аппаратуры.

Температурные деформации прибора можно представить как совокупность жёсткого поворота внутренней системы координат (BCK) относительно приборной системы координат (ПСК) и искажения BCK. Система BCK физически реализуется положением плоскости фотоприёмника изображения (матрицы) по отношению к задней узловой точке объектива (центру проектирования). Плоскость матрицы представляет собой основную координатную плоскость *XOY*. Система ПСК физически реализуется посадочной плоскостью прибора (направлением нормали к посадочной плоскости и направлением, проходящим через центры классного паза и классного отверстия). Искажение BCK проявляется в изменении калибровочных параметров BCK. Жёсткий поворот BCK относительно ПСК является систематической

ошибкой прибора. Под термоупругими деформациями прибора в статье понимается жёсткий поворот BCK относительно ПСК.

Заявленная точность приборов зависит от возможности исключить или свести к минимуму ошибку, вызванную термоупругими деформациями. В статье приводится результат исследования, нацеленный на поиск рекомендаций, обеспечивающих построение термостабильных конструкций приборов.

Причины возникновения термоупругих деформаций

Исследование термоупругих деформаций при наземных испытаниях сильно затруднено вследствие сложности построения стендовой базы, и в ряде случаев гораздо более достоверными являются наблюдения, выполненные в космическом полёте.

Для того чтобы понимать, как воздействуют на прибор термоупругие деформации, необходимо связать температурные колебания в узлах приборов при эксплуатации с ориентацией. Зная, что угол между приборами фиксированный, приборы находятся под экранно-вакуумной термоизоляцией (ЭВТИ), имея в течение определённого отрезка времени установившийся (стационарный) тепловой режим и располагая данными с приборов, проведём анализ.

Сначала необходимо определить, какое влияние оказывает нагрев электронных узлов прибора при его включении. На *рис.* 1 приведён пример, в котором КА сориентирован так, что приборы БОКЗ-М № 1 и № 2 не освещаются солнцем на протяжении всего рабочего интервала (6 ч). Бленды и объективы приборов осуществляют радиационный теплообмен с космическим пространством. По окончании рабочего интервала приборы БОКЗ-М выключаются и через 6 ч включатся снова, когда они опять будут находиться в тени КА. На рисунке показаны измерения температуры двух приборов БОКЗ-М и угла между осями Z используемой ВСК на двух орбитальных витках. Видно, что после включения приборы нагреваются ориентировочно на 10 °C за 4–5 ч. При этом в измерениях угла между осями Z ВСК приборов не наблюдается корреляция с показаниями температурных графиков. Из рисунка можно сделать вывод о слабом влиянии внутренних источников тепла на ошибки измерения, вызванные термоупругими деформациями прибора.



Рис. 1. Графики измерения температуры при включении приборов на КА и угла между осями *Z* соответствующих ВСК в течение двух орбитальных витков



Рис. 2. Показания термодатчиков, расположенных на установочных плитах приборов и в составе приборов звёздной ориентации БОКЗ-М60 при лётной эксплуатации

Рассмотрим другой пример, когда бленда прибора, в данном случае БОКЗ-М60, периодически освещается потоком солнечного излучения. Кроме того, на КА используется жидкостная система термостабилизации — лучшая с точки зрения обеспечения теплового режима, однако сложная в эксплуатации, обладающая значительной массой и применяемая далеко не на всех КА. На *рис. 2* отображены измерения двух термодатчиков, расположенных на установочных плитах приборов, и четырёх термодатчиков из состава приборов звёздной ориентации БОКЗ-М60. Из рисунка видно, что жидкостная система терморегулирования КА обеспечивает высокую стабильность температуры посадочных плит под приборами, значения которых практически не меняются в течение орбитальных витков. Температуры же приборов имеют видимые витковые колебания с амплитудой 1,5-2 °C, которые вызваны переходом из освещённого солнцем состояния в тень.

На *рис. 3* (см. с. 93) изображены разницы в углах ориентации четырёх приборов БОКЗ-М60 в процессе орбитального движения. На приведённых графиках видны низкочастотные витковые колебания углов между измерительными осями приборов, размах которых составляет 3–6 угл. с.

Данные угловые колебания, вызванные переходами из освещённого солнцем состояния в тень, полностью коррелируют с показаниями температурных датчиков прибора. КА двигается по солнечно-синхронной орбите, и основная его ориентация — орбитальная, т.е. полезная нагрузка большую часть времени сориентирована на центр Земли. Орбита прецессирует так, что вектор направления на Солнце всегда располагается в её плоскости. Это условие выполняется на протяжении всей миссии с точностью до единиц градусов дуги, что объясняет высокую повторяемость угловых деформаций приборов от витка к витку.

Из вышеизложенного следует, что основным источником термоупругих поворотов BCK в приборной системе координат при термостабилизации основания прибора являются его переходы из освещённого солнцем состояния в тень, и влияние именно этого эффекта следует снизить в первую очередь. Это заключение полностью согласуется с расчётами (методика расчёта представлена далее).

Методика расчёта термоупругих деформаций

При проектировании приборов анализ тепловых режимов и термоупругих деформаций целесообразно вести расчётным путём с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Данный метод позволяет учесть свойства материалов, радиационный теплообмен между поверхностями деталей прибора и космическим пространством, а также провести расчёт полей температуры и деформаций конструкции.



Рис. 3. Разность углов ориентации четырёх приборов БОКЗ-М60 на КА «Ресурс-П» № 3

Удобство заключается в возможности выполнения множества расчётов, необходимых для поиска оптимального решения, позволяющего минимизировать термоупругие повороты оптической оси прибора с применением наиболее простых конструктивных мер.

Расчёт осуществляется в три этапа. На первом этапе проводится тепловой расчёт, который позволяет получить поле температур в конструкции прибора. На втором этапе по заданному полю температуры проводится термоупругий расчёт с целью определения напряжённодеформированного состояния и перемещений элементов конструкции. По величинам относительных перемещений ключевых точек конструкции модели определяются углы поворота оси *Z* системы BCK относительно ПСК.

На первом и втором этапах расчёта задаётся набор граничных условий. Кроме того, считается, что внутренний теплообмен в приборе происходит посредством теплопроводности и излучения (конвекция отсутствует).

Для термоупругого расчёта в качестве граничных условий задаются только закрепления на посадочных местах. В нашем случае посадочное место реализовано классным пазом, классным отверстием и посадочной плоскостью. Для классного отверстия запрещаются перемещения в двух направлениях (по осям X и Y), для классного паза — в одном (по оси X) и для всей посадочной плоскости запрещается перемещение по третьему направлению (вдоль оси Z).

Рассматривается несколько вариантов расчёта. Тепловой расчёт ведётся для предельно горячего (максимально возможная температура посадочного места, прибор включён и солнце освещает поверхности деталей) и предельно холодного (минимально возможная температура посадочного места, прибор выключен и находится в тени) состояний прибора. Тепловые расчёты в предельных состояниях прибора позволяют оценить диапазон температуры, которую должны выдерживать материалы, покрытия и компоненты прибора в ходе длительной эксплуатации в космическом пространстве. Обычно для предельных режимов не оцениваются тепловые деформации.

Термоупругий расчёт проводится для более узкого диапазона температур посадочного места, в котором гарантируются точностные характеристики прибора. В результате термоупругого расчёта производится оценка углов поворота оси Z системы ВСК прибора по отношению к посадочным местам, которые реализуют ПСК и считаются неподвижными. Ось Z системы ВСК задаётся двумя точками (*puc. 4*): центром фоточувствительной матрицы (точка A на *puc. 4*) и точкой на линзе объектива, близкой к задней главной точке объектива (точка B на *puc. 4*), расположенной на фокусном расстоянии от плоскости фоточувствительно матрицы.



Рис. 4. Реализация ПСК и оси Z системы ВСК в термоупругом расчёте

Оценка углов поворота оси Z системы BCK относительно ПСК рассматривается для следующих вариантов температурных режимов:

- 1. Изменение собственного тепловыделения из состояния «выключено» в состояние «включено» при одинаковых внешних условиях. Данный вариант расчёта позволяет оценить поворот оси *Z* BCK при включении прибора. Также целесообразно проводить нестационарный расчёт с оценкой времени выхода прибора на точностной режим.
- 2. Изменение температуры посадочного места при одинаковых условиях освещения прибора и его режимах работы. Этот вариант расчёта позволяет оценить составляющую термоупругой ошибки, вызванную нестабильностью работы системы терморегулирования КА. В данном случае угловая ошибка относится к диапазону изменения температур посадочного места и измеряется в угловых секундах на градус Цельсия.
- Изменение условий внешнего освещения прибора: переходы тень/солнце при постоянной температуре посадочного места. Данный вариант расчёта позволяет выявить амплитуды витковых колебаний при идеальной работе системы терморегулирования КА.

Для проведения дальнейших расчётов воспользуемся нумерацией температурных состояний, представленных в *табл.* 1.

| | Прибор в | выключен | Прибор включён | |
|------------------------|---|------------------------------------|---|------------------------------------|
| | Посадочное место прибора «холодное» | Посадочное место прибора «горячее» | Посадочное место прибора «холодное» | Посадочное место прибора «горячее» |
| Прибор в тени | 1 | 3 | 5 | 7 |
| Прибор освещён солнцем | 2 | 4 | 6 | 8 |

| Таблица | 1. | Варианты | температурных | состояний | прибора |
|--------------|----|----------|-----------------|-----------|---------|
| 1 a Ostaliga | 1. | Dupmunin | remnepurypribix | cocrommin | npnoopu |

После выполнения термоупругих расчётов для заданных в *табл. 1* вариантов прибора проводится оценка угловых перемещений оси *Z* системы BCK (заданной в соответствии с *рис. 4*) при переходе из одного температурного состояния в другое. В *табл. 2* представлены переходы между температурными состояниями, которые характеризуют влияние на ориентацию оси *Z* системы BCK в систему ПСК следующих параметров:

- внутренние источники тепла;
- температура посадочного места;
- переход между состояниями тень/солнце.

| Причина термоупругих деформаций | Исследуемые переходы из одного температурного состояния в другое | | |
|---------------------------------|--|-------------------------|--|
| Внутренние источники тепла | 1-5 («холодное», тень) | 3-7 («горячее», тень) | |
| | 2-6 («холодное», солнце) | 4-8 («горячее», солнце) | |
| Посадочное место КА | 1-3 (выкл., тень) | 5-7 (вкл., тень) | |
| (внешние источники) | 2-4 (выкл., солнце) | 6-8 (вкл., солнце) | |
| Витковые термоциклы | 1-2 (выкл., «холодное») | 5-6 (вкл., «холодное») | |
| тень/солнце | 3-4 (выкл., «горячее») | 7-8 (вкл., «горячее») | |

В качестве примера рассмотрим осесимметричную конструкцию прибора (*puc. 5*, см. с. 96). На рисунке также показаны граничные условия, заданные на посадочных местах КЭ модели, такие как ограничение перемещения посадочной плоскости по оси Z системы ПСК, ограничение перемещения по осям X и Y относительно «классного» отверстия (начало координат ПСК) и ограничение перемещения по оси Y относительно «классного» паза. Принятая температура «холодного» и «горячего» посадочных мест — 0 и 25 °С соответственно.



Рис. 5. Упрощённая конечно-элементная (КЭ) модель прибора с круглым основанием и её граничные условия



Рис. 6. Температурные поля для восьми температурных состояний прибора

Солнце освещает прибор под углом 30° — допустимый угол засветки бленды. Внутренние источники тепла несимметричны: одна половина прибора имеет тепловыделение на 2 Вт больше. Суммарное тепловыделение — 8 Вт.

Рассчитанные поля температуры для различных температурных состояний прибора показаны на *рис. 6*.

В *табл. 3* отображены результаты расчёта углов поворота оси Z системы ВСК в систему ПСК при переходах между температурными состояниями. Как видно из *табл. 1*, наиболее значительные угловые повороты возникают при смене состояний тень/солнце. Изменение температуры посадочных мест прибора от 0 до 25 °C и внутренние источники тепла не приводят к ощутимым угловым деформациям.

| Причина термоупругих деформаций | Исследуемые переходы из одного температурного состояния в другое | | | |
|---------------------------------|--|--------------|----------------------|--------------|
| Внутренние источники тепла | 1-5 («хол.», тень) | <0,01 угл. с | 3-7 («гор.», тень) | <0,01 угл. с |
| | 2-6 («хол.», солнце) | <0,01 угл. с | 4-8 («гор.», солнце) | <0,01 угл. с |
| Посадочное место КА | 1-3 (выкл., тень) | <0,01 угл. с | 5-7 (вкл., тень) | <0,01 угл. с |
| (внешние источники) | 2-4 (выкл., солнце) | 0,02 угл. с | 6-8 (вкл., солнце) | 0,02 угл. с |
| Витковые термоциклы | 1-2 (выкл., «хол.») | 1,04 угл. с | 5-6 (вкл., «хол.») | 1,04 угл. с |
| тень/солнце | 3-4 (выкл., «гор.») | 1,02 угл. с | 6-8 (вкл., «гор.») | 1,02 угл. с |

Таблица 3. Повороты оси Z BCK для КЭ модели с круглым основанием

Основной причиной возникновения угловых деформаций является асимметричное поле температуры. При симметричном поле температур в симметричной конструкции возникают только объёмные деформации, которые не приводят к угловым поворотам. Нагрев бленды солнцем происходит под углом, поэтому приводит к образованию несимметричного поля температуры и значительным угловым деформациям.

Подходы к построению термостабильных конструкций приборов

Как показывает анализ, величину угловых поворотов оси Z системы BCK в систему ПСК, вызванных термоупругими деформациями, можно уменьшить следующими способами: изменением материала конструкции прибора; увеличением термостабильности за счёт изменения его конструкции; минимизацией влияния на измерительный базис нагрева и охлаждением бленды прибора.

Изменение материала конструкции прибора может вестись в направлении повышения теплопроводности материала и снижении его КТР. Как показывает моделирование, только эти две характеристики материала влияют на величины поворотов оси Z системы ВСК в систему ПСК при термоупругих деформациях. Более того, каждая из этих характеристик (в первом приближении) линейным образом влияет на величины угловых поворотов. Таким образом, увеличение теплопроводности, равно как уменьшение КТР материала конструкции, в два раза уменьшает величины угловых поворотов ВСК в ПСК.

Очевидно, что с точки зрения минимизации амплитуд угловых поворотов ВСК в ПСК использование алюминиевого сплава корпуса прибора предпочтительнее титанового. Даже с учётом того, что титан обладает в три раза более низким КТР по сравнению с алюминием, его теплопроводность в 12 раз хуже, что сильно увеличивает температурные градиенты и снижает равномерность поля температуры. В результате при переходе из одного температурного состояния в другое конструкция прибора имеет различные тепловые поля, что приводит к значительным угловым деформациям.

При этом использование вольфрам-медного сплава BM20, обладающего теплопроводностью алюминия и КТР титана, позволяет в 5 раз, по сравнению с алюминиевой конструкцией, снизить величины угловых поворотов ВСК в ПСК. Однако за это придётся заплатить увеличением массы почти в 10 раз.



Рис. 7. Основание фокальной плоскости космического телескопа, выполненное из материала CESIC. Фото заимствовано с веб-сайта www.cesic.de

Существуют материалы на основе керамики, обладающие свойствами близкими к сплаву ВМ20, однако имеющие плотность как у алюминия. Например, компания CESIC предлагает материал с одноимённым названием, который обладает теплопроводностью и плотностью как у алюминия при практически нулевом тепловом расширении. Cesic (carbon-fiber reinforced silicon carbide) состоит из карбидокремниевой (SiC) матрицы, армированной углеродными волокнами. Материал характеризуется исключительной твёрдостью и жёсткостью, высокой теплопроводностью, низким коэффициентом теплового расширения и относительно высокой вязкостью разрушения (из-за углеродных волокон). Из данного материала изготавливаются кронштейны для приборов звёздной ориентации на КА Meteosat третьего поколения. На *рис.* 7 показано основание фокальной плоскости космического телескопа, на которое устанавливается 200 ПЗС-матриц. Использование подобных материалов перспективно в целях минимизации термоупругих ошибок приборов и в целях снижения требований к системам термостабилизации КА.

Увеличение термостабильности за счёт изменения его конструкции

Уменьшение величин угловых поворотов оси Z системы BCK в систему ПСК происходит при уменьшении габаритов конструкции. Уменьшение габаритов приводит к увеличению теплопроводности конструкции, что эквивалентно улучшению теплопроводности материала. Увеличить теплопроводность конструкции можно за счёт увеличения толщины стенок корпуса или введением дополнительных теплопроводящих элементов. Моделирование показывает, что уменьшение габаритов прибора в два раза, равно как и увеличение сечений его стенок в два раза, приводит к пропорциональному изменению амплитуд угловых поворотов BCK в ПСК.

Кроме того, на величины термоупругих поворотов оси Z ВСК в ПСК сильно влияет осесимметричность конструкции. Наилучший результат достигается в круглой осесимметричной конструкции, модель которой показана на *рис.* 4. Изготовление аналогичной конструкции с квадратным основанием может от двух до пяти раз ухудшить результат. Ещё большие величины угловых поворотов оси Z системы ВСК в систему ПСК могут иметь место при горизонтальном расположении прибора, когда его посадочные лапы вынесены на боковую грань (*рис.* 8).



Рис. 8. Приборы звёздной ориентации фирмы Sodern в вертикальной и горизонтальной компоновках. Фото заимствовано с веб-сайта www.sodern.com

Также для уменьшения величин угловых поворотов ВСК относительно ПСК необходимо располагать места крепления прибора к термостабилизированной платформе на уровне, где заканчивается непосредственное солнечное воздействие при максимальном угле засветки бленды, так как переходы прибора из освещённого солнцем состояния в тень являются основным источником термоупругих поворотов. Это уменьшит градиент распределения температуры по конструкции прибора и влияние на измерительный базис, в разы уменьшая термоупругие повороты ВСК в ПСК.

Из вышеперечисленного следует, что оптимальная конструкция прибора состоит из осесимметричной оптической головки, в которой модуль обработки данных и модуль вторичного источника питания выведены в отдельный блок для уменьшения габаритных размеров прибора, с креплениями к термостабилизированной платформе, расположенными на бленде прибора.

Минимизация влияния на измерительный базис нагрева и охлаждения бленды

Данный подход разберём на примере создания прибора звёздной ориентации БОКЗ-МР. Оптическая система прибора представлена объективом O3K-60/1.4-K, разработанным в AO «ЛОМО», имеющим фокусное расстояние 60 мм и относительное отверстие 1:4. В приборе используется КМОП-матрица с размером пикселя $5,5 \times 5,5$ мкм. Таким образом, угловое поле зрения пикселя составляет 18,9 угл. с. Величины угловых поворотов оси *Z* системы ВСК в систему ПСК, которые можно считать допустимыми, не превышают 0,2 угл. с.

Рассмотрены варианты температурных состояний включённого прибора:

- изменение температуры посадочного места прибора при постоянных радиационных воздействиях (прибор либо находится в тени, либо освещён солнцем);
- переход прибора из тени в освещённое состояние при постоянных температурах посадочного места.

Результаты расчётов исходной конструкции БОКЗ-МР приведены на рис. 9 и в табл. 4.



Рис. 9. Распределение температуры (°С) для расчётных режимов 5–8 исходной конструкции БОКЗ-МР

| Причина термоупругих деформаций | Исследуемые переходы из одного температурного состояния в другое | Расчётное значение величины поворота ВСК относительно ПСК |
|------------------------------------|---|---|
| Посадочное место КА | 5-7 (вкл., тень) | 0,23 угл. с/°С |
| (внешние источники) | 6-8 (вкл., солнце) | 0,2 угл. с/°С |
| Витковые термоциклы | 5-6 (вкл., «холодное») | 4,51 угл. с |
| тень/солнце | 7-8 (вкл., «горячее») | 4,14 угл. с |

Таблица 4. Поворот оптической оси прибора при изменении режимов работы. Исходная конструкция

Анализ результатов моделирования конструкции прибора выявил чрезмерные угловые отклонения оптической оси при переходах из режимов работы без освещения от солнца (режимы 5 и 7) к режимам работы с освещением (режимы 6 и 8).

Для уменьшения относительных поворотов оптической оси при изменении режима работы разработана модификация прибора с теплоизолированной блендой.

Использование «тепловой развязки» бленды

В предлагаемой конструкции бленда установлена на шести теплоизоляционных стойках на корпусе прибора, нижняя часть бленды соединена непосредственно с корпусом, но имеет теплоизоляционный разрыв в уровне второй снизу диафрагмы. Кроме того, для выравнивания температурного поля по высоте объектива предусмотрены дополнительные теплоотводы.

Расчётная модель данной модификации конструкции прибора представлена на *puc. 10.* Внесённые в исходную конструкцию элементы (стойки бленды, соединитель бленды с корпусом, стеклопластиковый изолятор бленды и дополнительные медные теплоотводы объектива) выделены цветом на правом нижнем фрагменте рисунка.

Результаты расчётов модификации БОКЗ-МР с теплоизолированной блендой приведены на *рис.* 11 (см. с. 101) и в *табл.* 5.



Рис. 10. Расчётная КЭ-модель модификации с теплоизолированной блендой прибора



Рис. 11. Распределение температуры (°С) для расчётных режимов 5–8 модификации БОКЗ-МР с теплоизолированной блендой

| Таблица 5. Поворот оптической оси прибора при изменении режимов работы. |
|---|
| Модификация прибора с теплоизолированной блендой |

| Причина термоупругих деформаций | Исследуемые переходы из одного температурного состояния в другое | Расчётное значение величины поворота ВСК относительно ПСК |
|------------------------------------|---|---|
| Посадочное место КА | 5—7 (вкл., тень) | 0,24 угл. с/°С |
| (внешние источники) | 6—8 (вкл., солнце) | 0,24 угл. с/°С |
| Витковые термоциклы | 5-6 (вкл., «холодное») | 1,13 угл. с |
| тень/солнце | 7-8 (вкл., «горячее») | 1,18 угл. с |

В связи с неудовлетворительными значениями относительных поворотов оптической оси при изменении режима работы разработана модификация прибора с теплоизолированной блендой и теплоотводами бленды.

Использование «тепловой развязки» бленды с системой терморегуляции

В данной модификации для теплоизолированной бленды разработаны четыре медных теплоотвода, сопряжённых со второй снизу диафрагмой.

Расчётная модель этой модификации конструкции прибора представлена на *рис.* 12 (см. с. 102). Внесённые в исходную конструкцию элементы (медные теплоотводы бленды) выделены красным цветом. Суммарная эффективная площадь сечений теплоотводов бленды в расчётной модели составляет 51 мм².

Предполагается, что противоположенные концы теплоотводов бленды закреплены на термостабилизированной платформе, имеющей температуру посадочного места прибора при соответствующем режиме работы.

Результаты расчётов модификации БОКЗ-МР с теплоизолированной блендой и теплоотводами бленды приведены на *рис. 13* (см. с. 102) и в *табл. 6*.

В результате расчётного анализа модификации прибора с теплоизолированной блендой, оборудованной теплоотводами, выявлены недостаточно малые угловые отклонения оптической оси при переходах из режимов работы без освещения от солнца (режимы 5 и 7) к режимам работы прибора с освещением (режимы 6 и 8). Для того чтобы минимизировать относи-

тельные повороты ВСК относительно ПСК при изменении режима работы, разработана модификация прибора с теплоизолированной блендой в термостабильном кожухе.

| Таблица 6. Поворот оптической оси прибора при изменении режимов работы. | |
|---|--|
| Модификация с теплоизолированной блендой и теплоотводами | |

| Причина термоупругих деформаций | Исследуемые переходы из одного температурного состояния в другое | Расчётное значение величины поворота ВСК относительно ПСК |
|------------------------------------|---|---|
| Посадочное место КА | 5-7 (вкл., тень) | 0,24 угл. с/°С |
| (внешние источники) | 6-8 (вкл., солнце) | 0,24 угл. с/°С |
| Витковые термоциклы | 5-6 (вкл., «холодное») | 0,46 угл. с |
| тень/солнце | 7-8 (вкл., «горячее») | 0,56 угл. с |



Рис. 12. Расчётная КЭ-модель модификации прибора с теплоизолированной блендой и теплоотводами



Рис. 13. Распределение температуры (°С) для расчётных режимов 5–8 модификации БОКЗ-МР с теплоизолированной блендой и теплоотводами бленды

Использование кожуха бленды с системой терморегуляции совместно с «тепловой развязкой» бленды

В данной модификации прибор помещён в защитный кожух из АМг6 со стенками 0,8 и 1,0 мм.

Расчётная модель этой модификации конструкции прибора представлена на *puc. 14*. Прибор помещён на плиту из АМг6 толщиной 33 мм. Покрытые белой и чёрной эмалями поверхности прибора и кожуха, а также освещаемые солнцем части прибора и кожуха показаны на *puc. 15*. Особенность конструкции кожуха исключает прямое попадание солнечного света на наружные поверхности бленды (покрытые белой эмалью).

Верхняя поверхность кожуха покрыта изоляцией ЭВТИ, остальным его узлам задана соответствующая расчётному режиму температура посадочного места прибора. Узлам опорной плиты прибора в нижнем уровне установлена соответствующая расчётному режиму температура посадочного места прибора.

Результаты расчётов модификации БОКЗ-МР с теплоизолированной блендой в кожухе приведены на *рис. 16* (см. с. 104) и в *табл.* 7.



Рис. 14. Расчётная КЭ-модель прибора. Модификация с теплоизолированной блендой и в кожухе



Рис. 15. Поверхности прибора, покрытые эмалями (*слева*): красный цвет — белая эмаль; синий цвет — чёрная. Области бленды и кожуха, освещённые солнцем (*справа*); плотность потока — 1400 Вт/м²



Рис. 16. Распределение температуры (°С) для расчётных режимов 5–8 модификации БОКЗ-МР с теплоизолированной блендой в кожухе

| Таблица 🛛 | . Поворот оптической оси прибора при изменении реж | имов работы. |
|-----------|--|--------------|
| | Модификация с теплоизолированной блендой и в кож | ухе |

| Причина термоупругих деформаций | Исследуемые переходы из одного температурного состояния в другое | Расчётное значение величины поворота ВСК относительно ПСК |
|------------------------------------|---|---|
| Посадочное место КА | 5-7 (вкл., тень) | 0,36 угл. с/°С |
| (внешние источники) | 6-8 (вкл., солнце) | 0,36 угл. с/°С |
| Витковые термоциклы | 5-6 (вкл., «холодное») | 0,16 угл. с |
| тень/солнце | 7-8 (вкл., «горячее») | 0,1 угл. с |

Менее затратный в энергетическом плане вариант, минимально нагружающий систему обеспечения теплового режима (СОТР) аппарата, — с изолированной блендой. Однако при этом не удаётся уменьшить термоупругие колебания до заданного уровня. Вариант только с защитным кожухом, снижающий воздействие солнечного излучения на бленду прибора, также не позволяет снизить термоупругие колебания до заданного уровня.

При совместном использовании всех перечисленных мер по минимизации влияния на измерительный базис можно достичь требуемых величин угловых поворотов прибора. Данный подход позволяет сделать термостабильную конструкцию прибора не зависящей от габаритных и геометрических параметров.

Заключение

Важный вклад в обеспечение точности приборов вносит исключение или уменьшение ошибки, вызванной термоупругими деформациями прибора при штатной эксплуатации. Все рассмотренные подходы к построению термостабильных конструкций позволяют снизить термоупругие деформации, однако имеют свои недостатки. Минимизация влияния среды эксплуатации прибора на измерительный базис — наиболее предпочтительный вариант подхода к проектированию, поскольку он не зависит от конструктивных особенностей прибора. Минус этого метода — усложнение конструкции. Недостатком применения термостабильных материалов является внедрение технологии их производства и обработки, что ведёт к значительному увеличению издержек производства. Уменьшение размера прибора в совокупности с осесимметричностью конструкции не позволяет сделать звёздный датчик в виде моноблока, так как в моноблоке необходимо расположить процессор для обработки поступающей информации и вторичный источник питания прибора. Для обеспечения высокой термостабильности конструкции звёздных датчиков целесообразно использование всех приведённых в статье подходов в совокупности, но это влечёт за собой уменьшение технологичности прибора и увеличение издержек производства.

При наблюдении за приборами в процессе эксплуатации в космическом пространстве выявлены существенные колебания углов между измерительными осями приборов, вызванные термоупругими деформациями. Поскольку калибровка этих колебаний трудновыполнима, необходимо определить, какой вклад в их размах вносит конструкция КА.

Ways to decrease thermoelastic deformations of star trackers

G.A. Avanesov, R.V. Bessonov, N.N. Brysin, A.S. Kvashnin, V.E. Shevelev

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: aquaservice.ru@gmail.com

Modern spacecraft with high-and ultra-high-resolution imaging equipment requires an accurate system for orientation of angular position in space. The main tool to determine the high-precision orientation is stellar sensors. One of the types of star trackers errors is caused by thermoelastic deformations. Identification of their causes is associated with the determination of sources of thermal energy accumulated by the structure in orbital flight. The paper presents the causes of thermoelastic deformations and their influence on the tracker angular turns. Data of full-scale operation of the instruments and calculation models are given. The analysis of thermal conditions and thermoelastic deformations is made by using the finite element method which allows a lot of necessary calculations to find the optimal solution with minimal thermoelastic deformations of the tracker. The method of calculation of thermoelastic deformations and estimation of angular displacements is described. The following approaches to the construction of thermostable structures of the instruments are analyzed: the choice of materials with the necessary physical properties, design solutions, the creation of conditions for minimizing the impact of the operating environment. The advantages and disadvantages of each approach are noted. Proposed measures to reduce thermoelastic deformations should be applied both in the design of the star orientation device and the spacecraft and its equipment.

Keywords: star tracker, solar radiation, thermoelastic deformations, thermal expansion coefficient, thermal conductivity, thermostability

Accepted: 23.11.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-90-105