

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА БЛОКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ЗВЁЗД СИСТЕМЫ АСТРООРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ СВЯЗАННОЙ ТЕРМОУПРУГОЙ ЗАДАЧИ

© 2016 С. В. Цаплин, С. А. Большев

Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва

Работа посвящена исследованию теплового режима платформы чувствительных элементов, предназначенной для астроориентации космического аппарата при воздействии условий эксплуатации. Рассматривается температурное поле и напряжённо-деформированное состояние платформы под действием тепловыделения приборов платформы с учётом работы системы термостатирования на основе численного решения связанной термоупругой задачи. Расчёт температурного поля и поля деформаций платформы проводился методом конечных элементов с помощью программного пакета ANSYS. Для проведения расчётов на основе геометрической 3D-модели платформы была разработана конечно-элементная модель платформы. На первом этапе был выполнен расчёт стационарного поля скоростей теплоносителя в каналах платформы. Далее был выполнен расчёт температурного поля платформы с учётом гидродинамики теплоносителя. По рассчитанному полю температур проведён расчёт деформированного состояния платформы под действием тепла. Найдены угловые отклонения посадочных мест блоков определения координат звёзд (в среднем 2") по сравнению с первоначальным недеформированным состоянием. Показано, что угловые отклонения не превосходят предельно допустимых значений. Разработаны предложения по созданию высокоточной системы контроля положения блоков определения координат звёзд с точностью 1".

Космический аппарат, астроориентация, блок определения координат звёзд, температурное поле, поле деформаций, угловое отклонение.

Введение

В настоящее время для ориентации космического аппарата (КА) используются приборы астроориентации – блоки определения координат звёзд (БОКЗ) и измеритель угловых скоростей (ИУС), установленные на специальной платформе. На борту КА платформа БОКЗ подвержена влиянию тепловых и механических воздействий. Поэтому для обеспечения точности астроориентации необходимо прогнозировать её термомеханическое состояние с учётом всех факторов, воздействующих на КА.

Существенное значение имеют такие факторы, определяющие тепловой баланс конструктивных элементов платформы,

как тепловыделение от аппаратуры БОКЗ и ИУС в соответствии с режимами эксплуатации, циркуляция воздуха в гермообъёмах, работа системы обеспечения тепловых режимов (СОТР). На распределение температуры также влияют геометрические характеристики самой системы охлаждения, величина расхода теплоносителя и его теплофизические свойства. Среди остальных факторов, воздействующих на чувствительные элементы платформы и определяющих его надёжное функционирование, следует выделить динамические нагрузки (гармонические и случайные), воздействующие на КА, как на этапе транспортировки, так и на этапе выведения на орбиту.

Цитирование: Цаплин С.В., Большев С.А. Обеспечение теплового режима блока определения координат звёзд системы астроориентации космического аппарата на основе решения связанной термоупругой задачи // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15, № 2. С. 90-101. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-90-101

Определяющее значение в этом случае имеют силовая схема платформы, схема крепления платформы, физико-механические характеристики материала конструкции, в особенности её силовых элементов. При превышении значений напряжений, возникающих в результате воздействия внешних нагрузок на различных этапах функционирования, величины предела текучести для соответствующих материалов следует ожидать появления необратимых пластических деформаций в наиболее нагруженных зонах конструкции. Допустимыми считаются угловые отклонения осей БОКЗ вследствие деформаций конструктивных элементов платформы не более чем на 2" по сравнению с первоначальным недеформированным состоянием.

Функционирование астроприборов рассмотрено в [1–3], однако эти публикации касаются лишь проблем, связанных с навигацией и ориентацией космических аппаратов в штатных условиях эксплуатации без учёта воздействия тепловых и механических факторов.

Тематика экспериментальных методов оптических измерений для регистрации малых угловых величин имеет широкую освещённость в печати как в России, так и за рубежом. Предлагаемый ОАО «ЛМО» (г. Санкт-Петербург) прямой метод измерений по реперным точкам с использованием теодолита обеспечивает точность измерений до 20" в одном осевом направлении. Отечественный прецизионный инклинометр «Модель-128», предназначенный для измерения угла наклона относительно двух осей компании «Аменто» (г. Санкт-Петербург), не может быть использован из-за отсутствия возможности проведения измерения относительно трёх осей и недопустимо больших массогабаритных характеристик. В настоящее время отсутствуют методики, позволяющие измерять относительные угловые отклонения в единицы секунд с точностью до десятых долей.

Интерферометрические методы в экспериментальной термомеханике ис-

пользуются давно и при применении когерентных источников позволяют повышать точность проводимых измерений. По нашим оценкам при исследовании термомеханического состояния платформы БОКЗ в 3D-пространстве возможно с помощью уникальной интерферометрической системы определить относительное угловое отклонение с точностью 1.5".

В настоящее время ведутся работы по созданию автоколлиматорной системы для определения позиционирования в 3D твёрдых тел относительно базового элемента при стабилизации космической платформы [4]. Достигнутая точность позиционирования составляет 2" в лабораторных условиях при высокоточной обработки оптических поверхностей автоколлиматорной системы, однако её применение в условия эксплуатации КА ограничено.

Исследования термомеханического состояния платформы чувствительных элементов состоящей из БОКЗ и ИУС в реальных условиях эксплуатации актуальны, поскольку позволяют получить информацию об изменениях, происходящих с ней на борту КА, и прогнозировать их влияние на ошибки привязки и, следовательно, на качество получаемой видеоинформации. Известно, что в настоящее время точность определения ориентации КА в приборной системе координат составляет на геостационарной орбите $(\sigma_{xy} / \sigma_z) = (1.5/12)$ и на околоземной орбите $(\sigma_{xy} / \sigma_z) = (1.8/15)$ угловых секунд [5]. В действительности такая точность относится к работе БОКЗ без учёта термомеханической расстраиваемости. Следовательно, истинная величина ошибки будет больше приведённой. В связи с этим совместное осуществление физико-математического моделирования и экспериментальных исследований поля температур и деформаций платформы является наиболее эффективным методом исследования термомеханической расстраиваемости системы. В сущности, это даёт возможность выявить участки наибольшего

влияния тепловых и механических нагрузок на элементы конструкции платформы и уменьшить негативные изменения термомеханического состояния платформы, снижая тем самым величины ошибок привязки.

Актуальность предлагаемой работы определяется следующим. Согласно имеющейся в настоящее время теории ошибок координатно-временной привязки в большинстве случаев их учёт осуществляется в рамках детерминированной модели, оперирующей систематическими и стохастическими ошибками, не зависящими от времени и качественной стороны их эволюции. Очевидно, что в данном контексте термомеханическая расстраиваемость БОКЗ является прогнозируемой, т.к. процессы термоупругости, как правило, описываются уравнениями сплошной среды, не содержащими случайных составляющих.

Однако орбитальное движение и ориентация КА в трёхмерном пространстве как сложной механической системы не являются простыми с точки зрения механики. Причиной тому служит большое количество элементов управления, а работа каждого из них осуществляется с заданной погрешностью (ошибкой). В совокупности в любой момент времени текущая ошибка не известна точно и не может быть известна – её можно определить только по каким-либо данным, которые должны поступать в систему управления движением КА.

Таким образом, для повышения качества получаемой видеоинформации во время космической съёмки необходимо прогнозировать термомеханическое состояние БОКЗ и его влияние на ошибки координатно-временной привязки видеоинформации в условиях эксплуатации и иметь возможность компенсировать негативные воздействия тепловых и механических нагрузок.

Компоновка чувствительных элементов на платформе будет определять

оптимальные условия (с минимальной ошибкой измерений) астроориентации оптико-телескопической системы и высокое качество координатно-временной привязки видеоинформации в условиях эксплуатации КА. Такую задачу можно решить на основе физико-математического моделирования связанной термоупругой задачи [6–8] при тепловом воздействии внутренних источников тепла и при возможности компенсировать негативные воздействия на работу чувствительных элементов с допустимой относительной погрешностью 2".

Решению этой задачи посвящена данная работа. В результате решения задачи можно выбрать метод и средства для контроля изменения угловых отклонений чувствительных элементов платформы на этапах её сборки в лабораторных, цеховых и эксплуатационных условиях для решения задачи астроориентации оптико-телескопической системы КА.

Платформа чувствительных элементов

Рассматривается влияние внутренних источников тепла БОКЗ и ИУС на терморасстраиваемость платформы чувствительных элементов.

Общий вид платформы блоков определения координат звёзд приведён на рис. 1. Компоновка измерительных приборов включает: БОКЗ, ориентированные по трём звёздам, и ИУС. Такое расположение необходимо для достижения высокой точности астроориентации телескопа КА для обеспечения точной привязки изображения поверхности Земли.

Приборы, установленные на платформе, в процессе работы потребляют электрическую энергию, которая, преобразуясь в тепловую, нагревает платформу (рис. 2). Тепловыделение одного БОКЗ составляет 18 Вт, ИУС – 40 Вт.

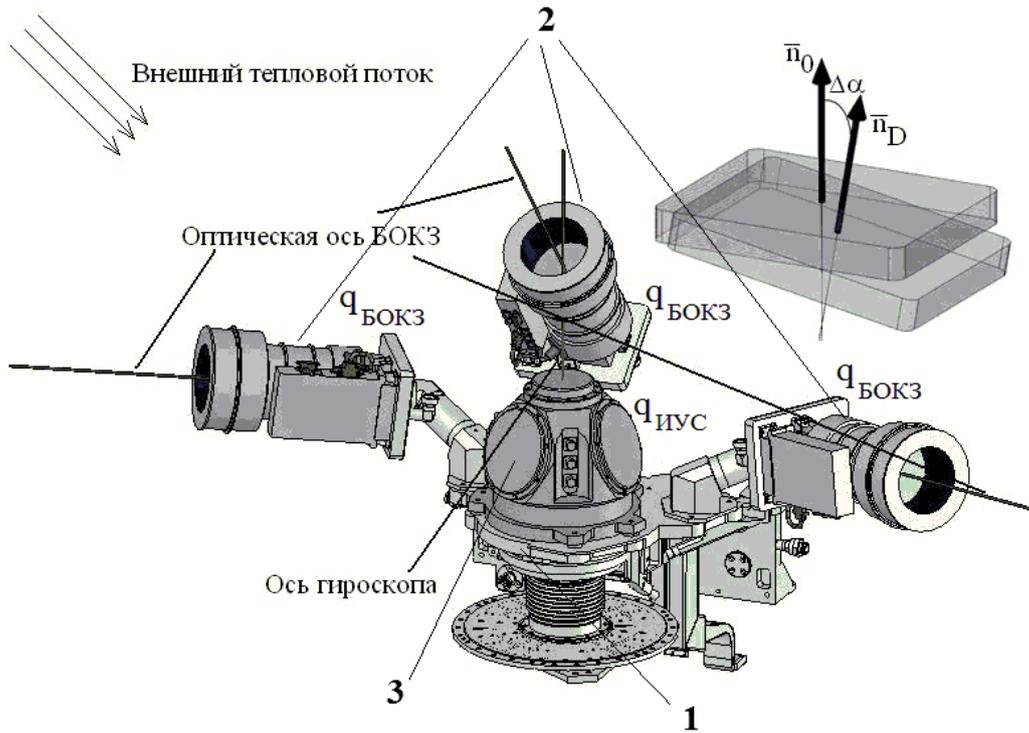


Рис. 1. Общий вид платформы чувствительных элементов:
 1 – платформа; 2 – БОКЗ; 3 – ИУС; $q_{\text{БОКЗ}}$ и $q_{\text{ИУС}}$ – соответственно тепловые потоки от БОКЗ и ИУС;
 $\Delta\alpha$ – угловое отклонение

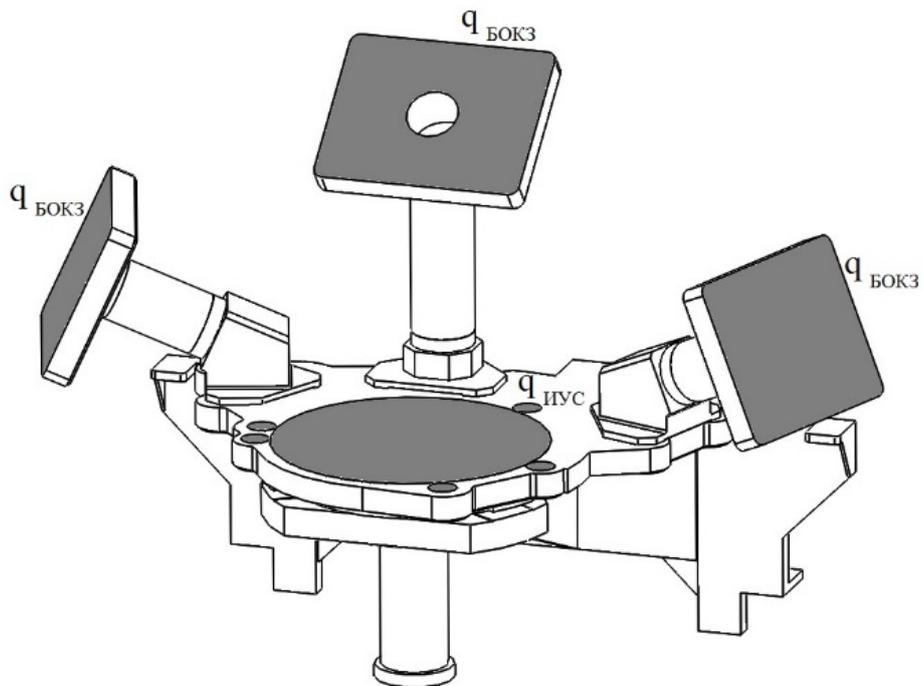


Рис. 2. Общий вид расчётной модели (поверхности тепловых потоков от ЧЭ платформы)

Поскольку градиент температуры приводит к деформации конструктивных элементов платформы [6–8], то для обеспечения наименьшего значения необходимо провести развязку по источникам тепла, исходя из конструктивных и температурных особенностей чувствительных элементов (ЧЭ) платформы. Развязка источников тепла осуществляется путём подачи теплоносителя с учётом расположения каналов в платформе и посадочных местах ЧЭ.

Для вычисления угловых отклонений конструктивных элементов платформы по сравнению с недеформированным состоянием необходимо последовательно решить следующие задачи:

- расчёт стационарного поля скоростей теплоносителя;
- расчёт стационарного поля температур конструктивных элементов платформы;
- расчёт стационарного поля деформаций конструктивных элементов платформы.

Схемы каналов теплоносителя платформы и посадочных мест БОКЗ приведены на рис. 3, 4. Каналы теплоносителя платформы и посадочных мест БОКЗ соединены между собой связующими магистралями в следующем порядке: канал платформы – посадочное место левого БОКЗ – посадочное место центрального БОКЗ – посадочное место правого БОКЗ (рис. 1, 2). Сами связующие магистрали в расчёте не рассматриваются. Однако для обеспечения непрерывности течения теплоносителя граничные условия задаются следующим образом: компоненты скорости и температура теплоносителя на выходе из предыдущего канала задаются как входные условия на вход в следующий канал. Радиусы входного и выходного сечений каналов теплоносителя в платформе, посадочных местах БОКЗ составляют 10 мм, сечения самих каналов имеют прямоугольную форму (рис. 3, 4). На вход в канал платформы подаётся теплоноситель ЛЗ-ТК-2 с расходом $100 \text{ см}^3/\text{с}$ и температурой 293 К.

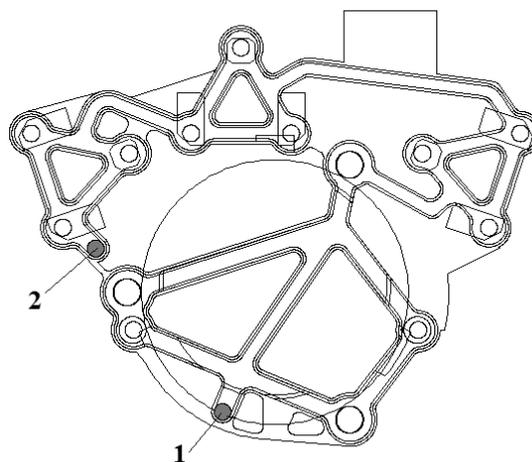


Рис. 3. Расположение каналов теплоносителя в платформе:
1 – входное сечение; 2 – выходное сечение

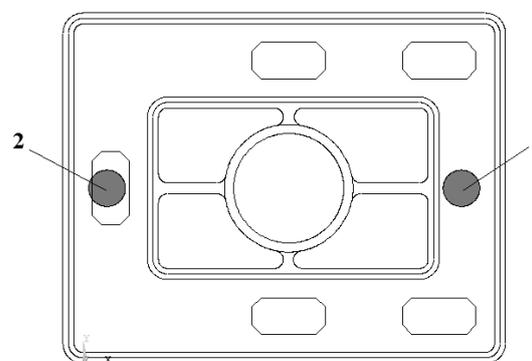


Рис. 4. Расположение каналов теплоносителя в посадочных местах БОКЗ:
1 – входное сечение; 2 – выходное сечение

В качестве материала, из которого изготовлены конструктивные элементы термостабилизированной платформы, а также кронштейны приборов БОКЗ, выбран алюминий АМГ6. Общая масса платформы составляет 66,5 кг. Температурное поле обусловлено не только источниками тепловыделения БОКЗ, но и циркуляцией теплоносителя в каналах платформы, посадочных местах БОКЗ. Поле деформации элементов платформы и в посадочных местах БОКЗ определяется их градиентами температуры. Совместное решение двух задач по определению температурного и деформированного полей в соответствии с [6–8] известно как связанная термоупругая задача. Рассмотрим её постановку.

Постановка связанной термоупругой задачи

Постановка гидродинамической задачи циркуляции теплоносителя в каналах платформы и посадочных мест БОКЗ. Стационарная гидродинамика теплоносителя в канале описывается системой уравнений Рейнольдса для вязкой несжимаемой жидкости [9]:

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \\ = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где \bar{u}_i – компонент осреднённой по Рейнольдсу скорости; u'_i – компонент пульсации скорости; \bar{p} – осреднённое по Рейнольдсу давление. Имеются следующие граничные условия:

- на стенках канала выполняется условие прилипания

$$\bar{\mathbf{u}}|_S = 0, \quad (3)$$

где S – поверхность стенок канала теплоносителя;

- на входе и выходе канала задан перепад давлений, соответствующий расходу теплоносителя:

$$\bar{p}|_{S_1} - \bar{p}|_{S_2} = \Delta p, \quad (4)$$

где S_1 и S_2 – соответственно входное и выходное сечение канала теплоносителя.

Постановка задачи определения температуры теплоносителя в каналах платформы, посадочных мест БОКЗ и платформы. Изменение температурного поля теплоносителя в каналах платформы, посадочных мест БОКЗ и платформы во

времени описываются уравнениями теплопроводности:

- для теплоносителя:

$$\frac{\partial T_{men}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \text{grad} T_{men} = a_{men} \nabla^2 T_{men}, \quad (5)$$

начальное условие

$$T_{men}|_{t=0} = T_0, \quad (6)$$

граничные условия:

$$T_{men}|_{S_1} = T_0, \quad (7)$$

$$T_{men}|_S = T_{nl}|_S; \quad (8)$$

- для платформы:

$$\frac{\partial T_{nl}}{\partial t} = a_{nl} \nabla^2 T_{nl}, \quad (9)$$

начальное условие

$$T_{men}|_{t=0} = T_0, \quad (10)$$

граничные условия:

$$T_{nl}|_S = T_{men}|_S, \quad (11)$$

$$-\lambda_{nl} \frac{\partial T_{nl}}{\partial n} \Big|_{S_{ИУС}} = q_{ИУС}, \quad (12)$$

$$-\lambda_{nl} \frac{\partial T_{nl}}{\partial n} \Big|_{S_{БОКЗ}} = q_{БОКЗ}. \quad (13)$$

Здесь a_{men} , a_{nl} – соответственно коэффициенты теплопроводности теплоносителя и платформы; $S_{ИУС}$ и $q_{ИУС}$ – соответственно поверхность посадочного места и тепловыделение прибора ИУС; $S_{БОКЗ}$ и $q_{БОКЗ}$ – соответственно поверхность посадочного места и тепловыделение прибора БОКЗ.

В начальный момент времени температурное поле всей модели предполагается однородным и равным номинальному значению температуры 293 К.

Постановка термоупругой задачи.

По известному полю температуры можно определить поле смещений. Уравнение для квазиравновесного состояния равно-

весия твёрдого деформированного тела, имеющего поле температур T , в отсутствие объёмных сил имеет вид [10]:

$$(\lambda + \mu) \cdot \text{grad div } \mathbf{u} - \mu \cdot \text{rot rot } \mathbf{u} = K\alpha \nabla T, \quad (14)$$

где α – коэффициент объёмного расширения; λ и μ – коэффициенты Ламэ; K – коэффициент всестороннего сжатия, связанные с модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона σ соотношениями:

$$\lambda = \frac{E\sigma}{(1-2\sigma)(1+\sigma)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\sigma)}, \quad (15)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\sigma)}.$$

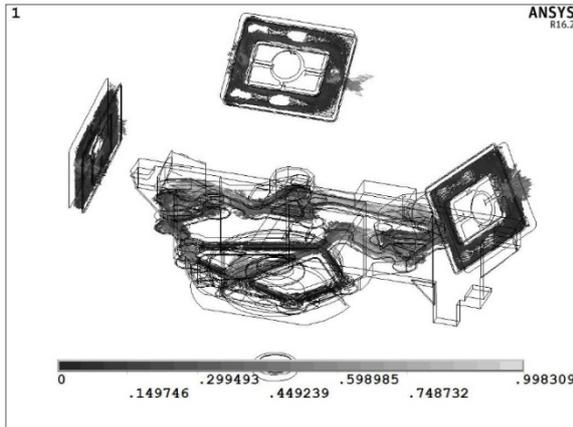


Рис. 5. Стационарное поле скоростей (скорость в м/с) теплоносителя в каналах при расходе $100 \text{ см}^3/\text{с}$

Из рис. 5 видно, что скорость движения теплоносителя в каналах платформы составляет около 1 м/с и в каналах кронштейнов – около 0.5 м/с, что указывает на турбулентный характер течения. Такие скорости достигаются на прямолинейных участках, а на изогнутых участках скорость составляет менее 0.1 м/с. Из-за сложной формы канала платформы и его прямоугольного сечения для обеспечения заданного расхода теплоносителя перепад давления должен быть около 2 кПа.

Стационарное температурное поле всех чувствительных конструктивных элементов платформы устанавливается в течение 40 минут. Поведение стационар-

ного температурного поля конструктивных чувствительных элементов платформы, показанное на рис. 6, обусловлено тепловыделением приборов: температура платформы минимальна, поскольку теплоноситель поступает сначала в неё. Температуры кронштейнов повышаются слева направо в порядке прохождения их теплоносителем.

Решение связанной термоупругой задачи

Связанная термоупругая задача (1)–(15) решалась численно методом конечных элементов в программном пакете ANSYS. Результаты расчётов гидродинамики теплоносителя в каналах приведены на рис. 5, распределения температуры платформы и теплоносителя – на рис. 6–8, распределения деформаций на платформе – на рис. 9–12.

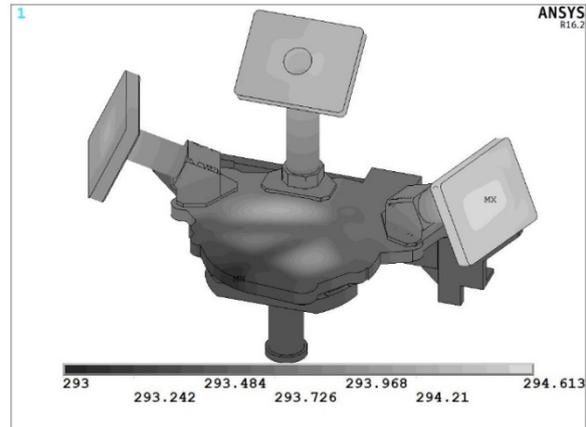


Рис. 6. Распределение температуры (в кельвинах) по всей модели в стационарном состоянии

ного температурного поля конструктивных чувствительных элементов платформы, показанное на рис. 6, обусловлено тепловыделением приборов: температура платформы минимальна, поскольку теплоноситель поступает сначала в неё. Температуры кронштейнов повышаются слева направо в порядке прохождения их теплоносителем.

Из рис. 7, 8 видно, что температура теплоносителя постепенно повышается при прохождении по каналу платформы, а затем – по каналам кронштейнов.

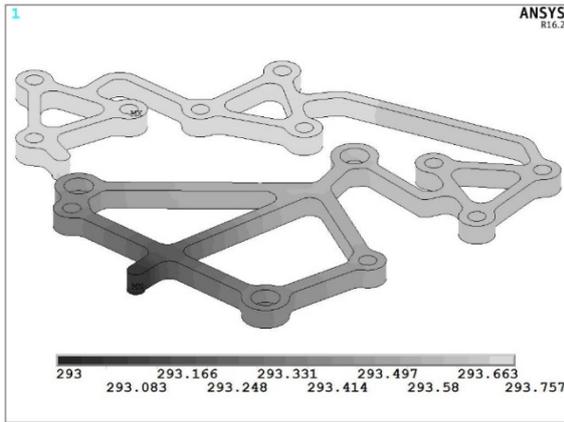


Рис. 7. Распределение температуры (в кельвинах) теплоносителя в канале платформы в стационарном состоянии

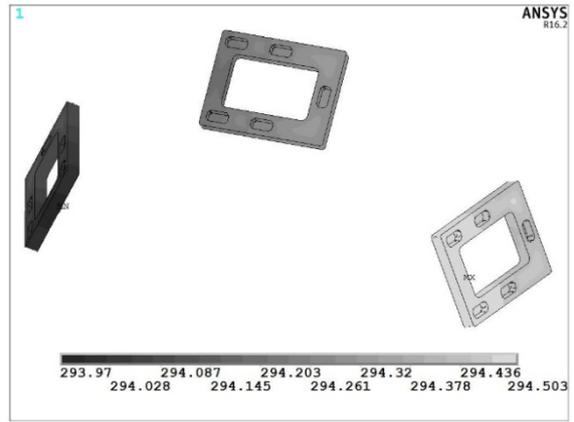


Рис. 8. Распределение температуры (в кельвинах) теплоносителя в каналах кронштейнов в стационарном состоянии

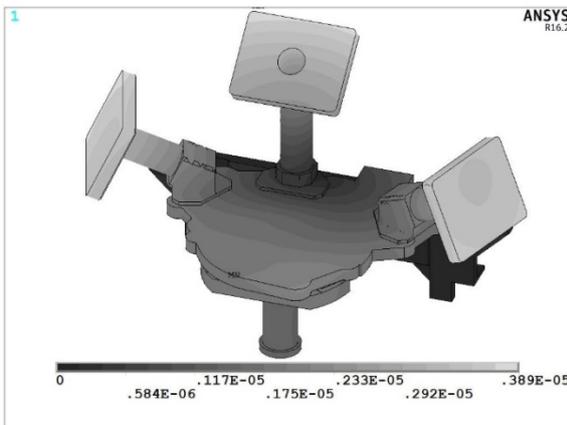


Рис. 9. Распределение суммарных деформаций (в м) по всей модели в стационарном состоянии

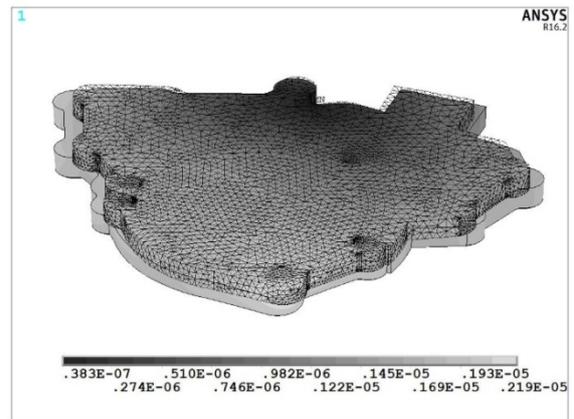


Рис. 10. Распределение суммарных деформаций (в м) на платформе в стационарном состоянии (контуром показано недеформированное состояние, для наглядности деформации сильно увеличены)

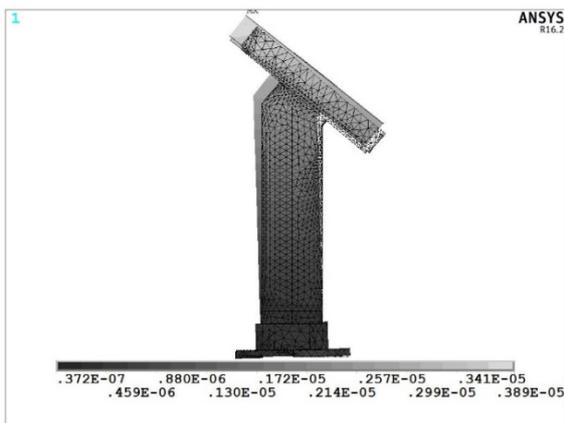


Рис. 11. Распределение суммарных деформаций (в м) на центральном кронштейне БОКЗ в стационарном состоянии (контуром показано недеформированное состояние)

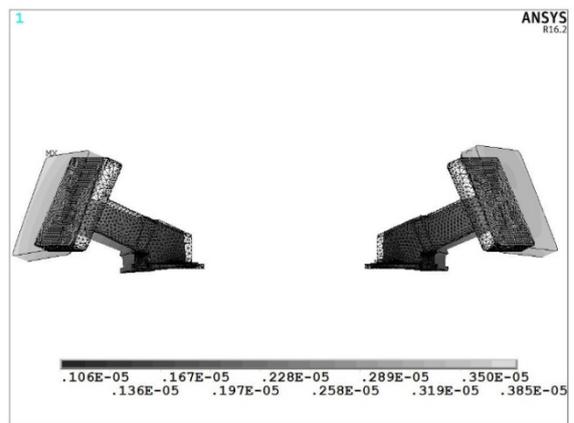


Рис. 12. Распределение суммарных деформаций (в м) на левом и правом кронштейнах БОКЗ в стационарном состоянии (контуром показано недеформированное состояние)

Характер деформаций конструктивных элементов платформы (рис. 9–12) определяется температурными полями соответствующих элементов: наибольшие смещения испытывают тонкостенные более теплонагруженные кронштейны, в то время как у массивной платформы смещения в два раза меньше. По нормальным компонентам смещений посадочных мест дополнительно рассчитывались их относительные угловые смещения.

Анализ результатов решения

Анализируя результаты расчёта тепловых воздействий в КА на стабильность конструктивных элементов термостабилизированной платформы чувствительных элементов, можно сделать ряд выводов.

Для обеспечения заданного расхода теплоносителя при данной конфигурации каналов скорость теплоносителя должна составлять 1 м/с в канале платформы и 0.5 м/с – в канале кронштейна (рис. 5), что указывает на турбулентный характер течения теплоносителя. При этом перепад давления в канале платформы составляет порядка 2 кПа вследствие его сложной формы.

При заданном расходе теплоносителя наибольшее значение температуры достигается на правом кронштейне БОКЗ – 294.6 К, сама платформа в локальных точках прогревается до 294.2 К (рис. 6). Наибольшее значение температуры теплоносителя в канале платформы составляет 293.75 К (рис. 7), в каналах кронштейнов – 294.5 К (рис. 8).

При таких температурных полях максимальные деформации всей конструкции составляют 3.9 мкм (рис. 9), в том числе на платформе – 2.2 мкм (рис. 10), на центральном кронштейне — 3.9

мкм (рис. 11), на левом и правом кронштейнах – 3.8 мкм и 3.9 мкм соответственно (рис. 12). Такие деформации соответствуют угловому отклонению посадочного места ИУС на 1.7", посадочного места центрального БОКЗ – на 1.8", левого – на 1.9" и правого – 1.7" по сравнению с недеформированным состоянием.

Известно [11], что для координатной привязки элемента съёмочной системы высокого пространственного разрешения (с элементом разрешения 10 м) требуется точность порядка 2" ориентации КА. Прибор БОКЗ имеет точность углового позиционирования $(\sigma_{xy}/\sigma_z) = (2/20)$, а термоупругие деформации не превышают 2". Следовательно ошибка координатной пространственной привязки составит 4÷6 м в зависимости от высоты орбиты КА при выполнении задач дистанционного зондирования Земли.

На основе проведённого исследования и на основе применения интерференционных методов разработаны предложения по созданию высокоточной системы (с точностью позиционирования 1") контроля положения блоков определения координат звёзд высокотехнологической платформы для астроориентации КА (лабораторный, цеховой, бортовой варианты), а также контроля оптической оси телескопа, ПЗС матрицы и радиотелескопа для выполнения дистанционного зондирования Земли с высоким разрешением.

Для контроля положения БОКЗ разработана методика определения положения БОКЗ в 3D на основе применения метода интерференции (рис. 13, 14).

Методика выполнения измерений позволяет контролировать относительное положения БОКЗ высокотехнологической платформы с точностью 1.5".

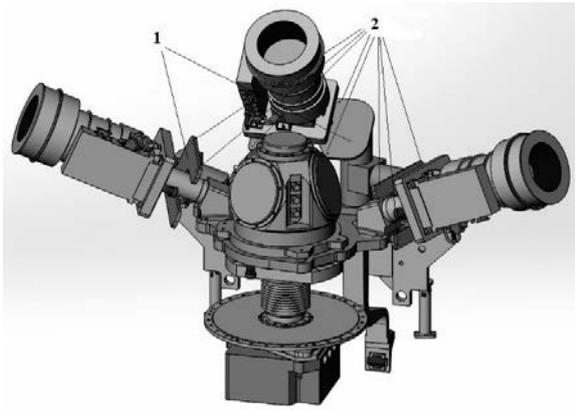


Рис. 13. Платформа (вид спереди):
1 – кронштейны оптической системы;
2 – оптические элементы
интерферометра Майкельсона

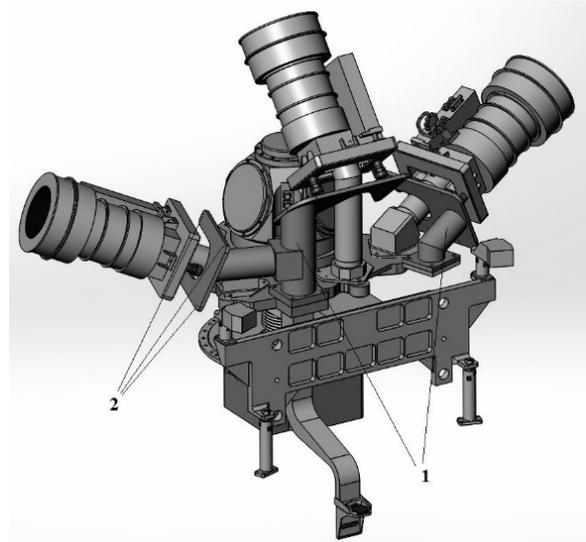


Рис. 14. Платформа (вид сзади):
1 – кронштейны оптической системы;
2 – оптические элементы
интерферометра Майкельсона

Заключение

В работе проведено исследование теплового режима платформы космического аппарата, предназначенной для астроориентации при воздействии тепловых источников.

В результате решения гидродинамической задачи циркуляции теплоносителя в каналах платформы и посадочных мест БОКЗ установлена целесообразность использования каналов с круглым сечением, что позволит уменьшить гидродинамические потери теплоносителя и приведёт к снижению градиента температур и угловых отклонений чувствительных элементов платформы.

В результате математического моделирования влияния тепловых факторов на конструктивные ЧЭ платформы посред-

ством численного решения связанной термоупругой задачи найдены: стационарное поле скоростей теплоносителя в каналах платформы, стационарные поля температур и деформаций конструктивных элементов платформы при заданных внешних тепловых воздействиях. Показано, что рассчитанные деформации соответствуют угловому отклонению посадочных мест центрального БОКЗ на 1.8", левого – на 1.9" и правого – 1.7" по сравнению с недеформированным состоянием и не превышают допустимые 2". Результаты исследований подтверждают необходимость использования системы (двух, трёх) приборов БОКЗ на КА, для которых требуется высокая точность определения параметров трёхосевой ориентации (до 2").

Библиографический список

1. Аванесов Г.А., Воронков С.В., Форш А.А. Стенд для динамических испытаний и геометрической калибровки астронавигационных приборов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 4. С. 74-79.
2. Аванесов Г.А., Воронков С.В., Форш А.А., Куделин М.И. Звёздные координаторы систем ориентации космических аппаратов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 4. С. 66-69.
3. Василейский А.С., Железнов М.М., Зиман Я.Л. Алгоритмы координатной привязки космических видеоданных по навигационным измерениям // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 4. С. 38-44.

4. Смирнов А.П., Романова Т.Л. Стабилизация космической платформы с помощью трёх автоколлиматоров // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 7. С. 69-75.

5. Никитин А.В. Использование данных навигационных приборов с целью получения и координатной привязки видеоданных дистанционного зондирования Земли высокого разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6, № 1. С. 272-281.

6. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. М.: Мир, 1964. 520 с.

7. Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир, 1975. 872 с.

8. Коваленко А.Д. Основы термоупругости. Киев: Наукова думка, 1970. 308 с.

9. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978. 736 с.

10. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1980. 469 с.

11. Дунаев Б.С., Красиков В.А., Никитин А.В. Наземный эксперимент по синхронному определению параметров угловой инерциальной ориентации тремя приборами БОКЗ-М // Сб. трудов второй Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов». Таруса: ИКИ РАН, 2010. С. 31-32.

Информация об авторах

Цаплин Сергей Васильевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Радиофизика, полупроводниковая микро- и наноэлектроника», Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва. E-mail: tsaplin@samsu.ru. Область научных интересов: тепломассообмен, космическое машиностроение.

Болычев Станислав Александрович, ведущий инженер-программист, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва. E-mail: tsaplin@samsu.ru. Область научных интересов: тепломассообмен, математическое моделирование, космическое машиностроение.

THERMAL CONTROL OF SPACECRAFT STAR SENSOR ATTITUDE CONTROL SYSTEM BASED ON THE SOLUTION OF A COUPLED THERMOELASTICITY PROBLEM

© 2016 S. V. Tsaplin, S. A. Bolychev

Samara National Research University, Samara, Russian Federation

The paper is devoted to the study of thermal control of the platform of star sensors designed for spacecraft attitude control under operating conditions. An optimal platform design with an arrangement of sensing elements is presented. The temperature field and the stress-strain state of the platform under the influence of heat sources is considered taking into account the operation of an air-conditioning system based on a numerical solution of a coupled thermoelasticity problem. The temperature field and the strain fields are calculated using the finite-element method with the help of the ANSYS software package. A finite-element model of the platform is developed on the basis of a geometric 3D model. The steady-state velocity field of the coolant in the platform channels is calculated at first. Then the temperature field of the platform is calculated with account for the coolant

Citation: Tsaplin S.V., Bolychev S.A. Thermal control of spacecraft star sensor attitude control system based on the solution of a coupled thermoelasticity problem. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2016. V. 15, no. 2. P. 90-101. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-90-101

dynamics. The strained state of the platform under the influence of heat is calculated on the basis of the calculated temperature field. Angular deviations of the mounting seats of star sensors (2 degrees on the average) are determined as compared with the undeformed state. It is shown that angular deviations of the seats of star sensors do not exceed admissible limit values (5 arc seconds). Proposals for creating a high-precision star sensor position control system with a 1 arc second- accuracy are developed.

Spacecraft, spacecraft attitude, star sensor, temperature field, strain field, angle deflection.

References

1. Avanesov G.A., Voronkov S.V., Forsh A.A. Bench for Dynamic Tests and Geometrical Calibration of Astro-Navigational Devices. *Journal of Instrument Engineering*. 2003. V. 46, no. 4. P.74-79. (In Russ.)
2. Avanesov G.A., Voronkov S.V., Forsh A.A., Kudelin M.I. Sidereal Coordinators of Orientation Systems of Space Vehicles. *Journal of Instrument Engineering*. 2003. V. 46, no. 4. P. 66-69. (In Russ.)
3. Vasilevsky A.S., Zheleznov M.M., Ziman Ya.L. Algorithms of Data Binding According to Navigational Measurements. *Journal of Instrument Engineering*. 2003. V. 46, no. 4. P. 38-44. (In Russ.)
4. Smirnov A.P., Romanova T.L. Stabilization of space platform with the use of three autocollimators. *Journal of Instrument Engineering*. 2014. V. 57, no. 7. P. 69-75. (In Russ.)
5. Nikitin A.V. Utilize navigation data for obtaining and coordinate reference high-resolution remote sensing images. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2009. V. 6, no. 1. P. 272-281 (In Russ.)
6. Boley B., Weiner J. Theory of thermal stresses. New York: John Wiley&Sons Inc., 1960. 517 p.
7. Nowacki W. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow: Mir Publ., 1975. 872 p.
8. Kovalenko A.D. *Osnovy termouprugosti* [Principles of thermoelasticity]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1969. 308 p.
9. Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid and gas mechanics]. Moscow: Nauka Publ., 1978. 736 p.
10. Nashchokin V.V. *Tekhnicheskaya termodinamika i teploperedacha* [Engineering thermodynamics and heat transfer]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1980. 469 p.
11. Dunaev B.S., Krasikov V.A., Nikitin A.V. Nazemnyy eksperiment po sinkhronnomu opredeleniyu parametrov uglovoy inertsiyal'noy orientatsii tremya priborami BOKZ-M. *Sb. trudov vtoroy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sovremennyye problem orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov»*. Tarusa: Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences Publ., 2010. P. 31-32. (In Russ.)

About the authors

Tsaplin Sergey Vasilevich, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Solid State Physics and Non-Equilibrium Systems, Samara National Research University, Samara, Russian Federation. E-mail: tsaplin@samsu.ru. Area of Research: heat and mass transfer, space engineering.

Bolychev Stanislav Alexandrovich, Principal Software Engineer, Samara National Research University, Samara, Russian Federation. E-mail: tsaplin@samsu.ru. Area of Research: heat and mass transfer, mathematical modeling, space engineering.