

## Влияние термоупругой деформации на точность измерения в звёздных датчиках ориентации

Н. Н. Брысин, О. В. Филиппова, В. Е. Шевелев

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия  
E-mail: brysin@mail.ru*

Рассмотрены вопросы влияния температуры конструкции звёздного датчика на точность его работы, в частности на поворот внутренней системы координат, формируемой конструктивом «оптическая система – приёмник изображения», относительно приборной системы координат, определяемой посадочной плоскостью прибора, вследствие термоупругих деформаций элементов конструкции звёздного датчика. Ранее авторами была проведена работа по исследованию влияния термоиндуцированных деформаций на взаимное угловое положение посредством моделирования методом конечных элементов. Авторами была разработана методика определения величины термоупругой составляющей погрешности измерений, и целью работы стало проведение экспериментального исследования специально изготовленного макета звёздного датчика по данной методике. Экспериментальная часть исследования проводилась на созданном ранее стенде контроля фокусировки, который включает в себя длиннофокусный коллиматор и вакуумную камеру с размещённым в ней термостолом с внешним термостатом, что позволяет выполнять оптические измерения в условиях вакуума при разной температуре посадочного места. Экспериментальная часть представляет собой два эксперимента. Один — при изменении температуры посадочного места в узком диапазоне (2 °С), а другой — в широком (60 °С). Полученные результаты показывают, что при изменении температуры посадочного места вследствие тепловой инерции происходит проявление температурной деформации, связанной с наличием градиента температуры по конструкции прибора. В узком диапазоне температур посадочного места после выравнивания поля температуры по конструкции влияние термоупругих деформаций пренебрежимо мало, но в широком диапазоне температур проявление термоупругих деформаций уже становится существенным.

**Ключевые слова:** звёздный датчик, термоупругость, термовакуумные испытания

Одобрена к печати: 17.12.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-87-92

Звёздный датчик формирует информацию об угловом положении приборной системы координат (ПСК), связанной с посадочным местом, относительно инерциальной геоцентрической системы координат текущей эпохи (ИСК). Сначала прибор определяет положение внутренней системы координат (ВСК), образованной системой «объектив – приёмник изображения», относительно ИСК. Затем с помощью заранее измеренной матрицы перехода из ВСК в ПСК прибор рассчитывает искомое положение ПСК в ИСК. Очевидно, что результат зависит от точности соответствия используемой матрицы перехода из ВСК в ПСК реальному взаимному положению ВСК и ПСК, которое имеет зависимость от температуры вследствие существования такого явления, как тепловое расширение материалов. Эта погрешность, вызванная термоиндуцированным взаимным поворотом ВСК и ПСК, вносит свой вклад в общий бюджет ошибок звёздного датчика, и соответственно, при проектировании высокоточного звёздного датчика необходимо принять меры для снижения величины данной ошибки, применив комплекс конструктивных решений, направленных на снижение или компенсацию влияния термоупругих деформаций (Аванесов и др., 2018).

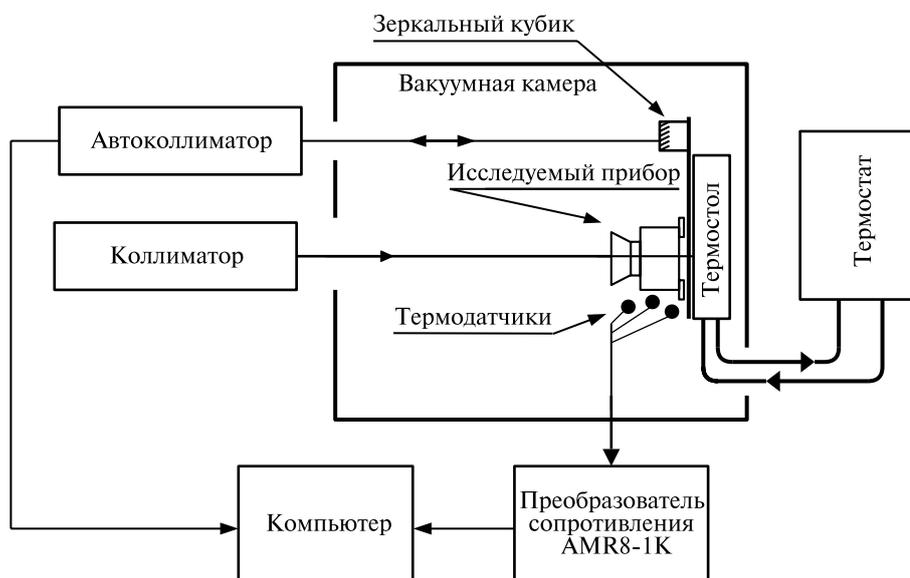
Цель работы заключается в исследовании методики определения величины термоупругой составляющей погрешности измерений, представляемой как поворот ВСК относительно системы координат посадочного места вследствие термоупругих деформаций конструкции.

Основная характеристика — зависимость изменения положения изображения бесконечно удалённого точечного источника от температуры посадочного места звёздного датчика. В работе предложено определять величину термоупругой деформации  $\epsilon$  как изменение взаимного углового положения ВСК и ПСК при изменении температуры посадочного места:

$$\varepsilon = \frac{\alpha_{pix} |\Delta r|}{\Delta T}, \quad (1)$$

где  $\Delta r$  — модуль радиус-вектора центра яркости изображения в пикселях;  $\Delta T$  — изменение температуры посадочного места, °С;  $\alpha_{pix}$  — номинальный угловой размер пикселя.

Для проведения исследований специально был изготовлен макет звёздного датчика с вторичным источником питания, объективом и фотоприёмным устройством. Экспериментальная часть исследования проведена на созданном в Институте космических исследований РАН стенде контроля фокусировки (СКФ), который помимо разнообразного оборудования включает вакуумную камеру с прозрачным окном оптического качества и систему регулирования температуры посадочного места под исследуемый прибор. Также в состав СКФ входят автоколлиматоры для контроля положения плиты, на которую установлен исследуемый прибор (Бессонов и др., 2017). Нахождение прибора в вакууме позволяет симитировать поле температуры в конструкции прибора, приближённое к тому, что предполагается в условиях эксплуатации. Схема СКФ с установленным на нём макетом звёздного датчика при проведении работ по определению влияния температуры посадочного места на изменение взаимного углового положения ВСК и ПСК, т.е. термоупругой составляющей погрешности измерения направления визирования, приведена на *рис. 1*.



*Рис. 1.* Схема СКФ с установленным на нём макетом звёздного датчика

На выходе длиннофокусного коллиматора, в фокусе которого расположена точечная диафрагма, формируется параллельный световой пучок, который, фокусируясь в испытуемом приборе, создаёт изображение бесконечно удалённого точечного источника, т.е. точечной диафрагмы на фоточувствительной матрице прибора. Изменение температуры посадочной плиты прибора системой терморегуляции стенда может приводить к повороту ВСК и ПСК вследствие температурного расширения материалов прибора и стенда. Поворот ВСК прибора относительно системы координат длиннофокусного коллиматора приводит к смещению положения изображения точечного источника на фоточувствительной матрице прибора. Поворот ПСК прибора вызван поворотом посадочной плиты прибора и соответствует повороту зеркального кубика, установленного на посадочной плите. Поворот зеркального кубика измеряется в системе координат двух автоколлиматоров как изменение отсчётов автоколлиматоров. Две системы координат СКФ — система координат длиннофокусного коллиматора и система координат автоколлиматоров — жёстко связаны между собой. В системе координат (СК) автоколлиматоров СКФ определяется как изменение ориентации ПСК относитель-

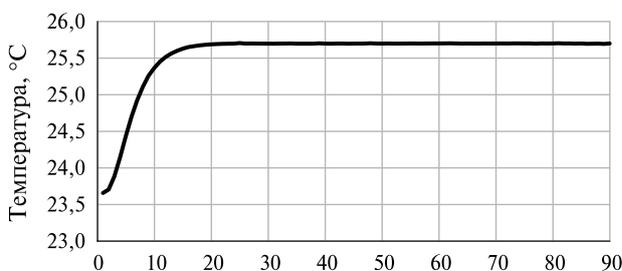
но исходного положения по автоколлимационным измерениям. Изменение ориентации ВСК относительно СК длиннофокусного коллиматора определяется относительно исходного положения по смещению изображения точечного источника.

Непрерывный автоколлимационный контроль положения посадочной плоскости по автоколлиматорам позволяет учесть влияние углового смещения корпуса макета звёздного датчика относительно системы координат СКФ, вызванного термоупругостью конструкции СКФ. В процессе измерений из-за температурного расширения конструкции крепления термостата посадочное место макета звёздного датчика испытывает как линейные, так и угловые смещения. Использование широкого параллельного пучка излучения на входе в вакуумную камеру позволяет пренебречь влиянием небольших линейных смещений на результат измерений. Для учёта угловых смещений требуется внести в данные об угловом положении, полученные от звёздного датчика, величину смещения посадочной плоскости, измеренную автоколлиматорами. Тогда выражение (1) приобретает следующий обобщённый вид:

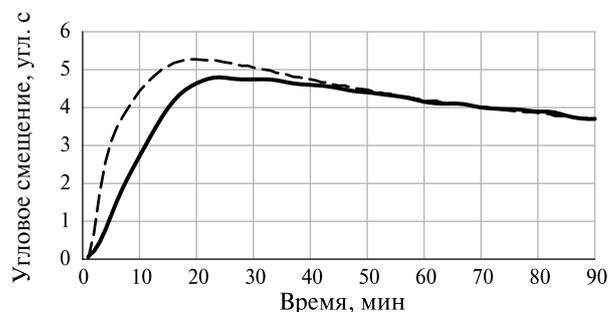
$$\varepsilon = \frac{\alpha_{pix} \Delta r - \Delta \alpha}{\Delta T}, \quad (2)$$

где  $\Delta \alpha$  — результат измерения автоколлиматорами углового смещения посадочного места.

Поскольку штатно работающая система обеспечения температурного режима (СОТР) космического аппарата поддерживает температуру посадочного места в узком диапазоне температур, то особый интерес представляет термоупругая реакция звёздного датчика именно в узком рабочем температурном диапазоне СОТР. Для эксперимента выбран диапазон, равный  $\pm 1$  °С относительно некоего среднего, т. е. размах составляет 2 °С. Прибор был выдержан 2 ч в условиях низкого вакуума при температуре 23,7 °С. Затем температура посадочного места была увеличена до 25,7 °С. На *рис. 2* показан график изменения температуры посадочного места. Результат автоколлимационного измерения смещения посадочной плоскости и график углового смещения изображения бесконечно удалённого точечного источника, зарегистрированного прибором, приведены на *рис. 3*. На *рис. 4* (см. с. 90) показан график разности углового смещения.



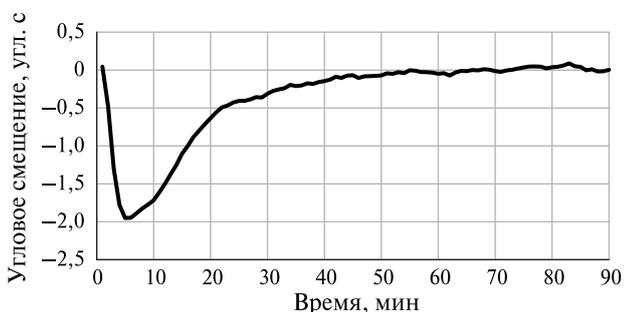
*Рис. 2.* График изменения температуры посадочного места во время эксперимента в узком рабочем температурном диапазоне



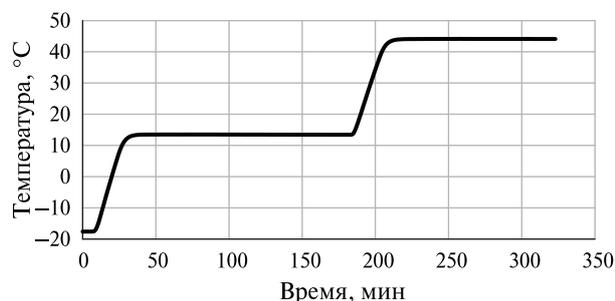
*Рис. 3.* Угловое смещение положения центра яркости бесконечно удалённого точечного объекта, зафиксированного исследуемым прибором (сплошная линия), и результат автокорреляционного измерения смещения посадочной плоскости прибора (штриховая линия)

Измерения углового смещения по автоколлиматору и звёздному датчику — относительные, и в данных экспериментах угловые смещения рассчитываются относительно величин, полученных при начальном значении температуры. Как видно из *рис. 4*, после начала изменения температуры посадочного места происходит проявление термоупругой деформации: увеличение разности угловых смещений достигает  $-1,9$  угл. с, но после выдержки в течение 90 мин при новой температуре график вернулся к околонулевому значению. Такой характер термоупругой деформации обусловлен появлением температурного градиента по конструкции макета звёздного датчика вследствие наличия тепловой инерции. Это также видно

по несовпадению левой половины графиков на *рис. 3*. Таким образом, можно сделать вывод, что при достаточно длительных периодах колебания температуры посадочного места проявление термоупругой деформации в узком диапазоне температур не повлияет на погрешность измерения звёздного датчика.



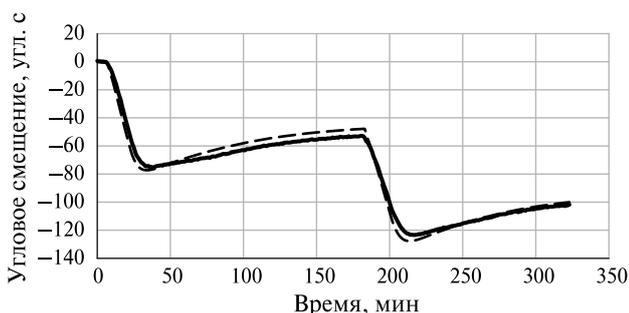
*Рис. 4.* График разности между измерениями углового смещения посадочной плиты автоколлиматором и углового смещения изображения бесконечно удалённого точечного источника, регистрируемого макетом звёздного датчика во время эксперимента в узком рабочем температурном диапазоне



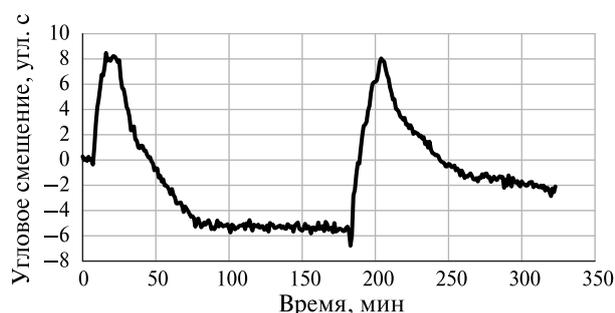
*Рис. 5.* График измерения температуры посадочного места во время эксперимента в широком рабочем температурном диапазоне

Выше было показано, что температурные деформации практически не проявились и расчёт величины термоупругой деформации  $\epsilon$  даёт её нулевое значение. Для определения величины  $\epsilon$  был проведён аналогичный эксперимент в широком диапазоне температур: от  $-15$  до  $+45$  °С. Определение изменения взаимного углового положения ВСК и ПСК исследуемого прибора относительно СК СКФ проводилось при значениях температуры посадочного места  $-15$ ,  $+15$  и  $+45$  °С. Для обеспечения стационарного поля температур как испытуемого макета звёздного датчика, так и СКФ при достижении заданной температуры посадочного места происходила выдержка не менее 90 мин. На *рис. 5* показан график изменения температуры посадочного места прибора.

На *рис. 6* приведены результаты измерения угловых смещений посадочной плоскости и положения центра яркости бесконечно удалённого точечного объекта, зафиксированного исследуемым макетом звёздного датчика.



*Рис. 6.* Результаты углового смещения положения центра яркости бесконечно удалённого точечного объекта, зафиксированного исследуемым прибором (сплошная линия), и результат автокорреляционного измерения смещения посадочной плоскости прибора (штриховая линия)



*Рис. 7.* График разности между измерениями углового смещения посадочной плиты автоколлиматором и угловым смещением изображения бесконечно удалённого точечного источника в широком рабочем температурном диапазоне

Результат данного эксперимента показал наличие влияния термоупругой деформации на погрешность определения направления визирования. В этом эксперименте расхождение

в смещении посадочной плоскости и изображения бесконечно удалённого точечного источника становится намного более очевидным по сравнению с предыдущим экспериментом. Изменение углового положения обусловлено кронштейном термостола, детали которого имеют существенные температурные расширения при работе термостола в широком температурном диапазоне. На *рис. 7* (см. с. 90) изображён график разности между показаниями прибора и автоколлиматоров, т. е. это и есть термоиндуцированное угловое смещение ВСК относительно ПСК. Так же как и в предыдущем эксперименте, имеет место тепловая инерция во время изменения температуры посадочного места, которая проявляется в момент изменения температуры посадочной плиты в виде максимумов на графике.

Полученные в эксперименте в широком рабочем температурном диапазоне данные явно показывают, что у макета звёздного датчика есть термоупругая деформация. При расчёте её величины по формуле (2) получим следующие значения:

- для диапазона от  $-15$  до  $15$  °С —  $0,18$  угл. с/°С;
- для диапазона от  $15$  до  $45$  °С —  $0,10$  угл. с/°С.

Как видно по графику и полученным значениям термоупругой деформации, величина поворота ВСК относительно ПСК зависит от температурного диапазона. Причём если бы для расчёта были взяты крайние точки температурного диапазона, то была бы получена меньшая величина —  $0,033$  угл. с/°С. Поэтому в широком диапазоне температур необходимо проводить измерения также и в промежуточных точках. Очевидно, что количество промежуточных точек и температурный интервал определяются исходя из требований к погрешности измерения и рабочему температурному диапазону.

В целом проведённые исследования макета звёздного датчика по разработанной авторами методике показали её пригодность для определения величины термоупругой составляющей погрешности измерений. Полученные результаты показывают, что при изменении температуры посадочного места вследствие тепловой инерции происходит проявление температурной деформации, связанной с наличием градиента температуры по конструкции прибора. В узком диапазоне температур посадочного места после выравнивания поля температур по конструкции влияние термоупругих деформаций пренебрежимо мало, но в широком диапазоне температур проявление термоупругих деформаций уже становится существенным.

## Литература

1. Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Брысин Н. Н., Квашин А. С., Шевелев В. Е. Пути снижения термоупругих деформаций приборов звездной ориентации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 90–105. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-90-105.
2. Бессонов Р. В., Брысин Н. Н., Полянский И. В., Воронков С. В., Белинская Е. В., Строилов Н. А., Полищук Г. С., Трегуб В. П., Завгородний Д. С. Стенды для определения фотограмметрических параметров высокоточных звездных датчиков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 107–117. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-107-117.

## Influence of thermoelastic deformation on measurement accuracy in star orientation sensors

N. N. Brysin, O. V. Philippova, V. E. Shevelev

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*

*E-mail: brysin@mail.ru*

The paper considers the influence of the temperature of the stellar sensor design on the accuracy of its operation, in particular, the rotation of the internal coordinate system formed by the optical system — image receptor construct relative to the instrumental coordinate system determined by the instrument's seating plane due to thermoelastic deformations of the stellar sensor's structural elements. Previously, the authors investigated the effect of thermally induced deformations on the mutual angular position by means of finite element modeling. The authors have developed a technique for determining the value of the thermoelastic component of the measurement error, and the aim of the work was to carry out an experimental study of a specially made model of a star sensor according to this technique. The experimental part of the study was carried out on the previously created focusing control stand, which includes a long-focus collimator and a vacuum chamber with an external thermostat placed in it, which allows carrying out optical measurements under vacuum conditions at different seating temperatures. The experimental part consists of two experiments: one at changing the seat temperature in a narrow range, 2 °C, and the other in a wide range, 60 °C. The results show that when the seating temperature changes, due to thermal inertia, there is a temperature deformation associated with the presence of a temperature gradient across the device design. In a narrow temperature range of the seating, after the temperature field is leveled across the structure, the influence of thermoelastic deformations is negligible, but in a wide temperature range, the manifestation of the thermoelastic deformations becomes significant.

**Keywords:** star tracker, thermoelasticity, thermal vacuum testing

Accepted: 17.12.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-87-92

### References

1. Avanesov G. A., Bessonov R. V., Brysin N. N., Kvashnin A. S., Shevelev V. E., Ways to decrease thermoelastic deformations of star trackers, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 90–105 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-90-105.
2. Bessonov R. V., Brysin N. N., Polyanskiy I. V., Voronkov S. V., Belinskaya E. V., Stroilov N. A., Polischuk G. S., Tregub V. P., Zavgorodniy D. S., Test benches for the determination of star tracker photogrammetric parameters, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 107–117 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-107-117.