

Перспективные бортовые средства подтверждения точностных характеристик аппаратуры дистанционного зондирования Земли

Карпунин Д.Н.

*Центральный научно исследовательский институт машиностроения,
ЦНИИмаш, ул. Пионерская, 4, Королев, Московская область, 141070, Россия
e-mail: dimcar@yandex.ru*

Аннотация

Рассмотрены вопросы создания перспективных высокостабильных средств подтверждения характеристик оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на этапах лётных испытаний и эксплуатации в течение всего срока активного существования космического аппарата (КА), обеспечивающих возможность проведения высокоточной бортовой калибровки с прослеживаемостью к национальным эталонам. Объектами исследования являются бортовые модели чёрных тел (МЧТ) на основе фазовых переходов высокочистых веществ и их эвтектических соединений, создаваемые для подтверждения точностных характеристик аппаратуры ДЗЗ в инфракрасном диапазоне спектра излучения, а также высокостабильные приёмники излучения, обеспечивающие измерение внешних воздействующих факторов окружающего КА пространства. В основу создания высокостабильных бортовых средств заложено уникальное свойство веществ в процессе фазовых переходов, а также особая конструкция, обеспечивающая требуемые технические характеристики. Проведены

теоретические и экспериментальные исследования, в том числе в условиях микрогравитации. В результате установлено, что физические принципы и конструктивные особенности, заложенные в основу работы излучателей, позволяют обеспечить прослеживаемость получаемых результатов измерений к национальным эталонам, компенсация температурной зависимости датчиковой аппаратуры обеспечит получение достоверных данных об объектах измерений, а именно, о состоянии собственной внешней атмосферы (СВА) КА. Полученные результаты направлены на реализацию требований международных и национальных нормативных документов, регламентирующих необходимость подтверждения точностных характеристик в процессе эксплуатации, которая в настоящее время не обеспечена с требуемыми метрологическими характеристиками. Создание перспективных средств бортовой калибровки подтверждения точностных характеристик аппаратуры ДЗЗ обеспечит достижение требуемого уровня качества получаемых данных и повысит их конкурентоспособность.

Ключевые слова: бортовой излучатель, фазовый переход, модель чёрного тела, бортовая калибровка, температурная зависимость.

В соответствии с «Концепцией развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года» целью создания российской орбитальной группировки космических средств ДЗЗ является максимальное удовлетворение потребностей национальной экономики и

обеспечение конкурентоспособности в области ДЗЗ. Поставленная цель может быть достигнута путём получения достоверных и качественных данных.

Необходимым условием достоверности данных ДЗЗ является осуществление процесса калибровки бортовой ОЭА ДЗЗ. При этом требуется обеспечить заданную точность, воспроизводимость, долговременную стабильность единиц величин и их прослеживаемость к национальным эталонам.

В процессе эксплуатации применяются различные методы и средства подтверждения точностных характеристик аппаратуры ДЗЗ. Однако их соответствие заданным требованиям как по стабильности воспроизведения и предельно допустимой погрешности измерений, так и по прослеживаемости результатов к национальным эталонам в настоящее время не обеспечивается.

Обычно в качестве опорных источников ИК излучения для полётного контроля характеристик аппаратуры ДЗЗ применяются бортовые модели абсолютно черных тел с переменной температурой излучателя. Однако в орбитальных условиях сталкиваются с проблемой невозможности контроля равномерности по полю зрения и долговременной стабильности используемых калибровочных бортовых МЧТ, входящих в существующие системы полётного контроля. В МЧТ с варьируемой температурой излучателя измерение температуры осуществляется термодатчиками, поверка которых в условиях космического полёта невозможна; кроме этого постоянство излучательной способности АЧТ на орбите также не контролируется, что в совокупности приводит к неконтролируемому изменению уровня излучения МЧТ в процессе эксплуатации. Более того, излучательная способность не подвергается в настоящее время измерениям и может быть оценена только расчётно-

экспериментальным методом. В связи с этим стабильность характеристик такого рода бортовых калибраторов не может быть подтверждена и оценена, прослеживаемость к национальным эталонам в данном случае не обеспечивается.

Одним из возможных путей решения проблемы калибровки аппаратуры в процессе эксплуатации является применение бортовых МЧТ с использованием фазовых переходов веществ и их эвтектических соединений, обладающих высокой стабильностью и воспроизводимостью, которые получили широкое применение для воспроизведения единиц величин в наземных условиях, в том числе при создании государственных эталонов и формировании температурной шкалы [1].

Одновременно с этим необходимо проводить исследования по определению дополнительных источников погрешности измерений аппаратуры ДЗЗ, например, загрязнение оптических поверхностей и излучение СВЧ КА [2]. Однако применяемые средства для определения этих параметров эксплуатируются в жёстких условиях окружающего пространства, одним из воздействующих факторов которого является температура. В связи с этим необходимо обеспечить корректировку температурной зависимости выходных сигналов применяемых средств во всём температурном диапазоне эксплуатации.

Теоретические исследования создания перспективных бортовых моделей чёрных тел

Излучение МЧТ должно максимально приближаться к излучению «абсолютно черного тела», т.е. соответствовать излучению, описываемому формулой Планка. Степень этого приближения оценивается эффективной излучательной

способностью, которая зависит от геометрии излучающей полости, оптических свойств стенок и равномерности распределения температуры внутри полости. Высокая повторяемость результатов измерений определяется применяемым высокочистым веществом, обеспечивающим равномерность теплового поля в рабочем режиме для высокоточной калибровки бортовой аппаратуры ДЗЗ.

Принцип работы бортового излучателя основан на явлении фазового перехода веществ, при котором в процессе плавления (затвердевания) рабочего вещества воспроизводится значение температуры с высокой точностью, что необходимо для получения опорной точки сравнения результатов периодических измерений бортовой аппаратуры ДЗЗ в инфракрасном диапазоне спектра излучения. Стабильность воспроизводимого значения температуры достигается применением металлов с высокой степенью чистоты.

В соответствии с характеристиками плавления и кристаллизации преимущественными для данных исследований являются излучатели на фазовых переходах веществ, рабочий режим которых находится в фазе плавления. Более того, при эксплуатации контроль процесса кристаллизации рабочего вещества осуществляется существенно сложнее. Данный аргумент связан с невозможностью контроля параметров теплообмена в системе «космический аппарат – бортовой излучатель» с требуемой точностью [3]. Применение тепловых радиаторов не позволит поддерживать температуру МЧТ в требуемом диапазоне, т.к. теплосброс будет обеспечиваться с большой скоростью, а постоянный подогрев рабочего вещества не представляется целесообразным по энергетическим причинам. Вместе с

тем процесс кристаллизации будет постоянно изменяться на процесс плавления, что может привести к несоответствию требуемых характеристик.

Значение излучательной способности выше 0,99 обеспечивается применением особой конструкции, представляющей собой полость с нанесёнными различными покрытиями. За счёт совокупности использования высокочистых веществ и применяемой конструкции МЧТ будет обеспечено постоянное значение яркости бортового излучателя, которое эквивалентно значению температуры фазового перехода выбранного высокочистого вещества [4].

По результатам анализа современных технологий нанесения покрытий и существующих конструкций МЧТ для проведения расчётов разработаны оптико-геометрические и тепловые модели основного излучающего элемента МЧТ – медной полости (МП).

Геометрическая модель МП одинакова во всех расчётных случаях и представлена на рисунке 1.

Температуры по МП выводились для 16 точек: для цилиндрической зоны $z \leq 140$ мм и для конической зоны $140 < z \leq 150$ мм. Плоскость визирования расположена в сечении $z = 40$ мм.

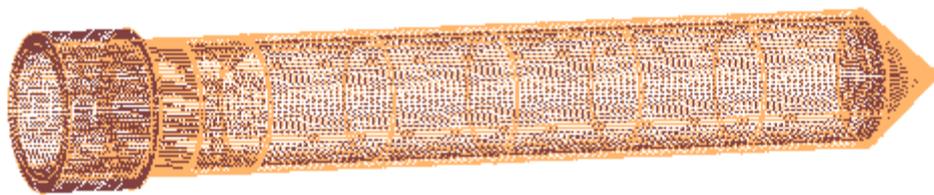


Рисунок 1 – Геометрическая модель МП МЧТ

При анализе МЧТ было выявлено, что на поведение галлия и динамику поля температур на стенках МП значительное влияние оказывают тепловые процессы, протекающие на торце МЧТ. Для оценивания тепловых процессов на торце МЧТ дополнительно разработаны оптико-геометрические и тепловые модели (ОГТМ) с отличающимися геометрическими и теплофизическими свойствами на торцевой части МЧТ [5, 6]. Расчёты проведены для 11 различных случаев. Основные характеристики и особенности ОГТМ представлены в таблице 1. Расчёты проведены до моментов времени 18000 с, после которых наблюдалось резкое увеличение температур МП в связи с достижением жидкой фазы галлия. Результаты расчётов представлены на рисунке 2.

В течение времени плавления галлия температура МП оставалась практически равной $T_{пл.Ga}$ ($\Delta T < 0,01$ °C). Более детальный анализ температур характерных точек (1, 6, 11 и 16) показывает, что дно полости достигает температуры 29,76 °C в момент времени 2000 с. Далее до момента времени 17500 с температура изменяется в пределах 0,01 °C.

Таблица 1

D_{Ga} , мм	$T_{нагр}$, °С	Условие теплообмена на торце	Температура окружающего пространства, К	$T_{нач}$, °С
14	35	Отсутствуют крышка и кольцо	80	25
14	31	То же	80	25
2	35	"	80	25
2	31	"	80	25
4	31	"	80	25
4	31	Имеются крышка и кольцо; наличие идеальной тепловой связи фторопласта с кольцом и крышки с корпусом	80	22
4	31	Имеются крышка и кольцо; кондуктивные тепловые связи фторопласта с кольцом и крышки с корпусом не учитываются	80	22
4	30,26	То же	80	22
4	130	"	80	22
6	31	"	80	22
4	35	"	80	22

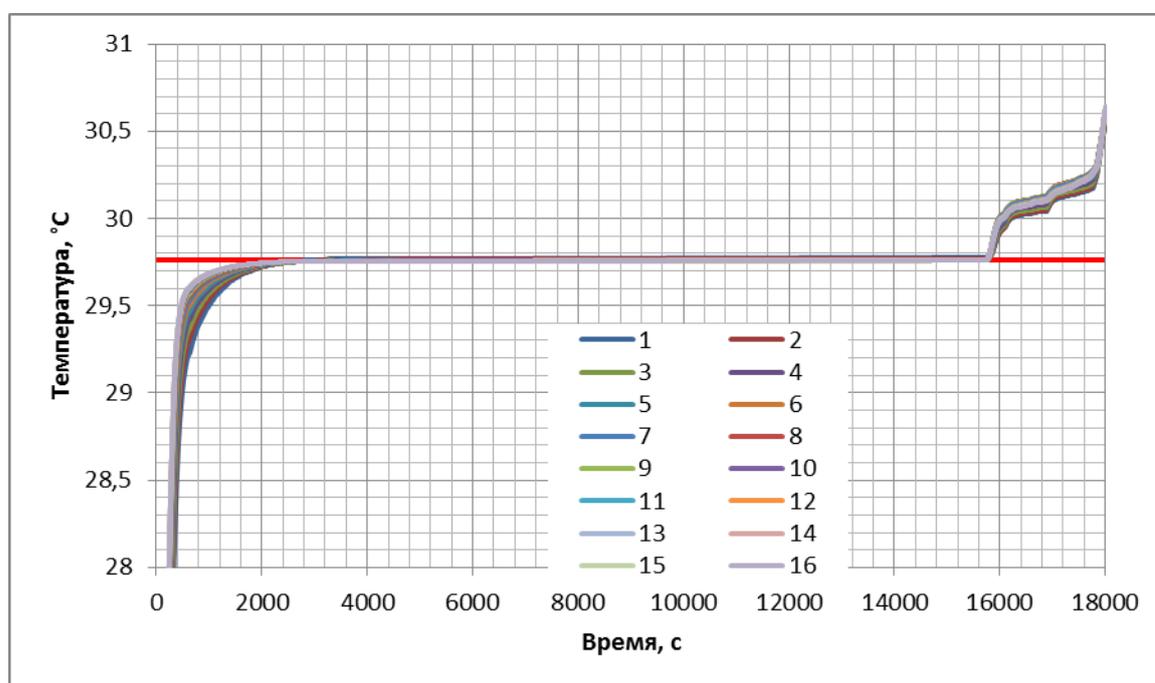


Рисунок 2 – Температуры в точках МП в зависимости от времени

Наблюдение за процессом плавления галлия показало, что в начальные моменты времени происходит прогрев фторопластового стакана и нагревание галлия до $T_{пл.Ga}$. Характерное поле температур к моменту времени 650 с приведено на рисунке 3.

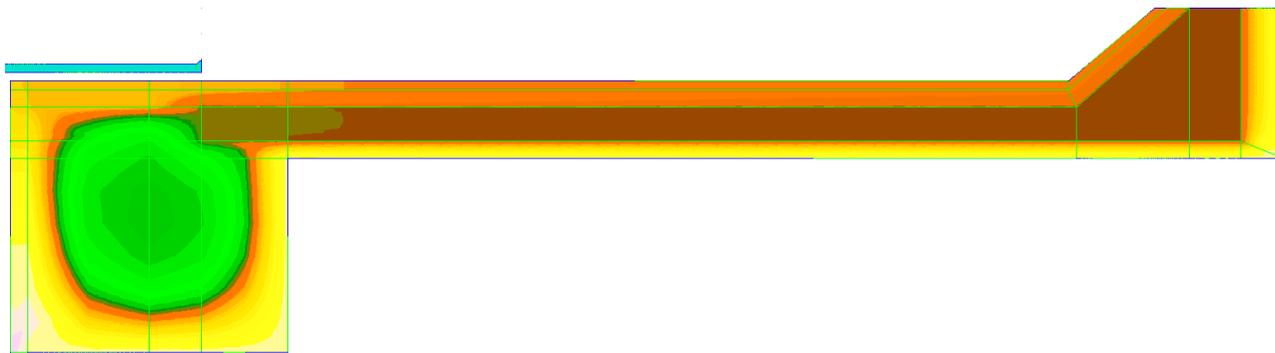


Рисунок 3 – Поле температур в момент времени 650 с

Из рисунка видно, что происходит интенсивный переток тепла по диску, тем самым обеспечивая рост температуры в начальных участках МП. Это обусловлено высокой (по сравнению с фторопластом) теплопроводностью диска из нержавеющей стали. Тем самым обеспечиваются более высокие температуры в начале МП по сравнению с температурами на конусообразной части. Всё это приводит к тому, что плавление галлия начинается не только с наружной поверхности фторопластового стакана, но также и со стороны торцевой части, что и продемонстрировано на рисунке 4.

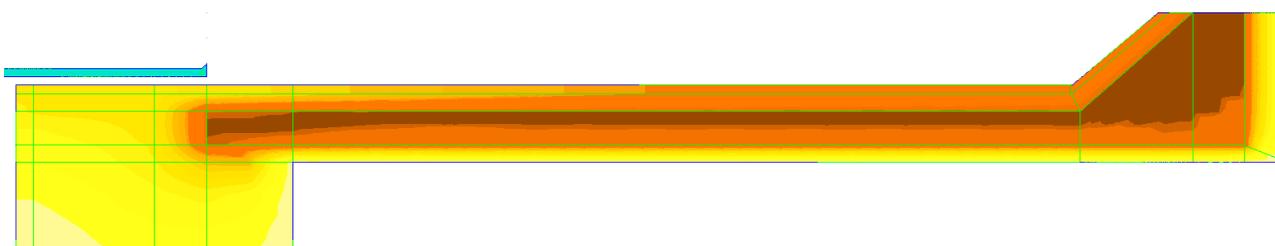


Рисунок 4 – Поле температур в момент времени 7300 с

По результатам моделирования следует сделать вывод, что полное расплавление слоя галлия происходит раньше всего в цилиндрической части ближе к торцу (рисунок 5).

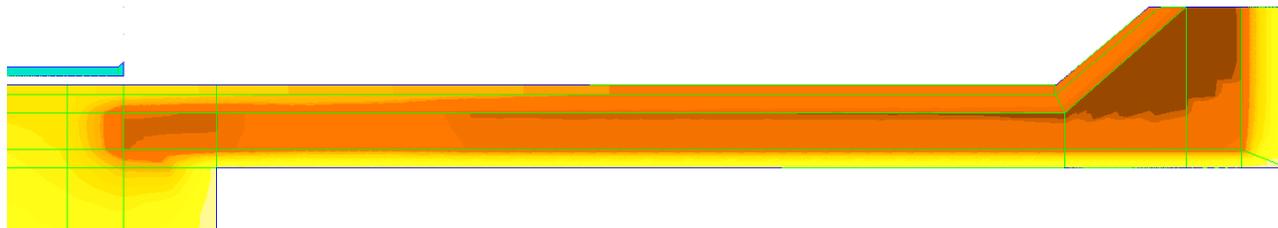


Рисунок 5 – Поле температур в момент времени 9600 с

Значение эффективной излучательной способности в каждом индивидуальном случае зависит от геометрии полости, оптических характеристик внутренних стенок полости, температурного распределения вдоль стенок полости и условий наблюдения.

Направленная эффективная излучательная способность неизотермической полости определяется следующим уравнением:

$$\varepsilon_{x,\alpha,\lambda,T(x),T_0} = \frac{L_{x_0,\alpha,\lambda,T(x)}}{L_{AMЧТ(\alpha,\lambda,T_0)}}, \quad (1)$$

где $T(x)$ – распределение температуры вдоль стенок полости;

$L_{x_0,\alpha,\lambda,T(x)}$ – спектральная яркость эффективная (сумма самоизлучающего и отраженного) излучения элемента стенки полости с координатой x_0 в направлении α при длине волны λ ;

$L_{\text{АМЧТ}}(\alpha, \lambda, T_0)$ – спектральная яркость черного тела при температуре T_0 (называемой эталонной температурой) в направлении α при длине волны λ , определяемой законом Планка.

Нормальная спектральная эффективная излучательная способность $\epsilon_{n(S, \lambda, T(x), T_0)}$ может быть получена усреднением $\epsilon_{d(x_0, \alpha, \lambda, T(x), T_0)}$ по площади круга S , ограниченного апертурой полости в направлении наблюдения параллельно оси полости.

Для оценки влияния конструктивных размеров полости на величину её излучательной способности расчеты проведены при вариациях длины цилиндрической части полости от 100 мм до 154 мм и диаметра апертуры от 9 мм до 20 мм.

Результаты расчета зависимости $\epsilon_{\text{eff}} = f(L/D)$ при вариации длины полости от 100 до 154 мм, значений излучательной способности от 0,7 до 0,97 при диаметре апертуры $D = 12$ мм представлены на рисунке 6.

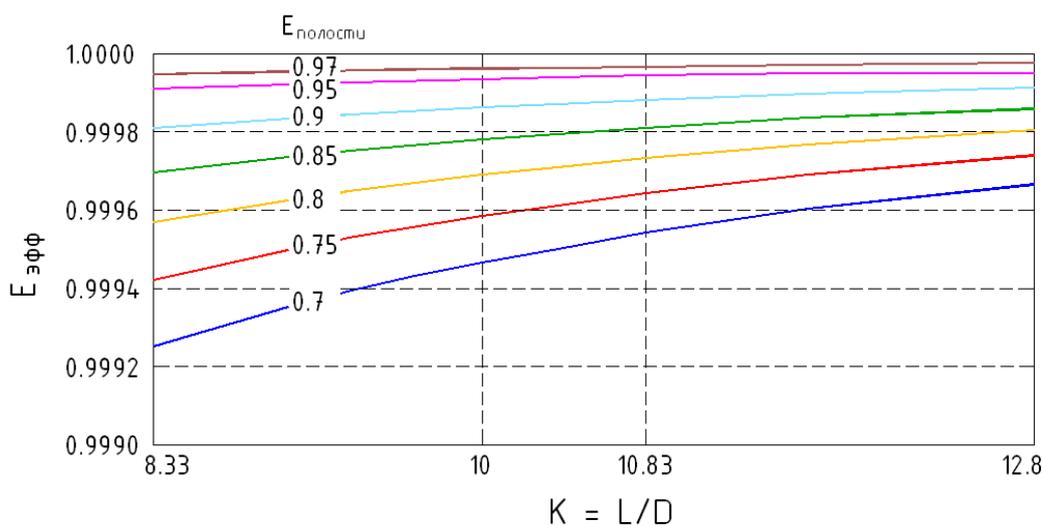
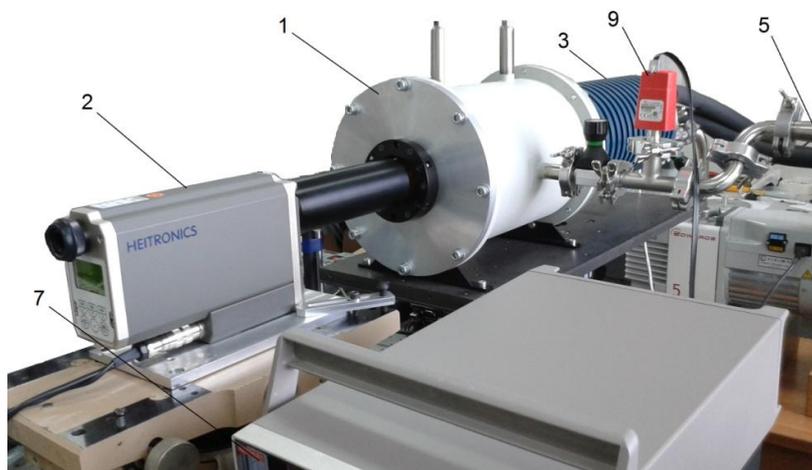


Рисунок 6 – Значения излучательной способности при различной длине полости и диаметре апертуры 12 мм

Экспериментальные исследования перспективных бортовых средств подтверждения точностных характеристик

На основе расчётно-теоретических исследований и изменённой конструкции для подтверждения принятых технических решений разработаны макетные образцы МЧТ с изменяемым рабочими веществами. Проведение испытаний осуществлено с использованием оборудования и оснастки, представленных на рисунке 7.

Для контроля температуры при проведении испытаний, внутри полости макета установлен платиновый термометр сопротивления, сигнал от которого передаётся через аналогово-цифровой преобразователь на персональный компьютер. В качестве системы обеспечения температурного режима использована жидкостная система термостабилизации на основе термостата.



1 - вакуумная камера; 2 - пирометр; 3 - МЧТ при температуре плавления галлия; 4 - термостат для установки температуры теплообменника МЧТ при температуре галлия; 5 - система вакуумирования камеры; 6 - компьютер; 7 - мультиметр для измерения сопротивления платинового термометра сопротивления теплообменника; 8 - система вакуумирования внутреннего объема МЧТ при

температуре галлия (термоизоляция теплообменника); 9 - датчик измерения давления (вакуума) в камере; 10 - датчик измерения давления (вакуума) во внутреннем объеме МЧТ при температуре галлия (задний объем).

Рисунок 7 – Внешний вид установки для испытаний

Испытания проведены в соответствии с программой испытаний с использованием трёх рабочих веществ: галлий, галлий-индий и галлий-олово.

Результаты измерений представлены на рисунке 8.

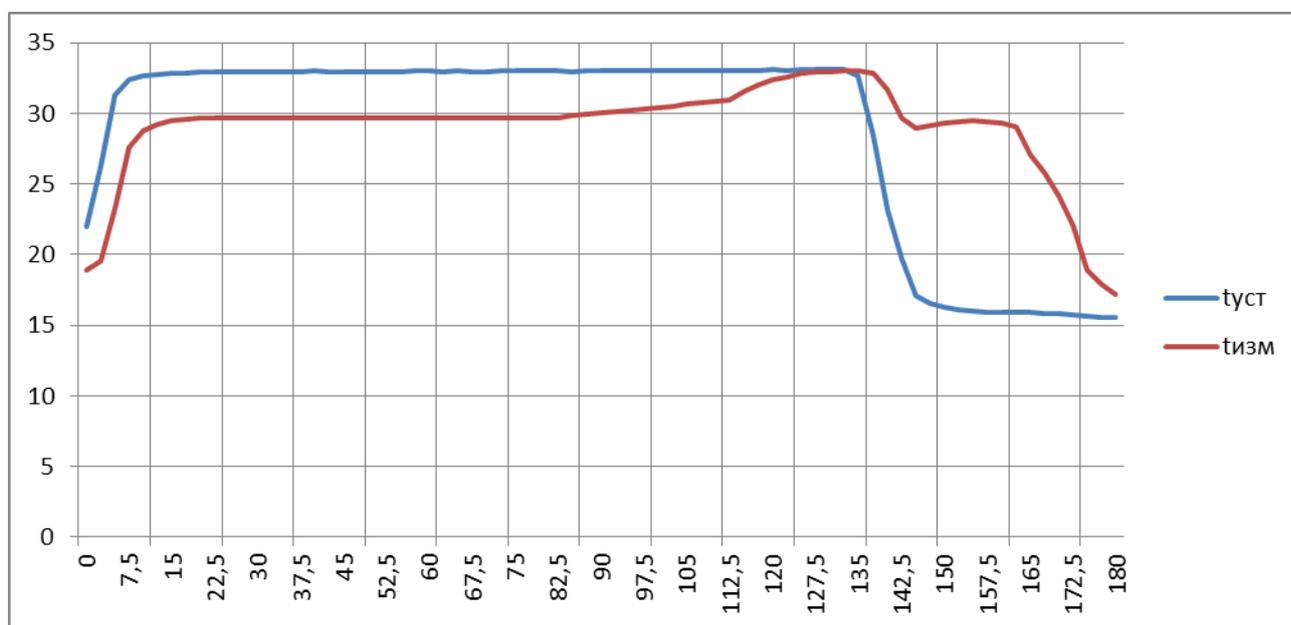


Рисунок 8 – Результаты измерения плавления галлия

Как видно из рисунка измерение температуры макетных образцов излучателей происходит с высокой точностью, проявляется время начала и окончания плавления при температурах, не превышающих рабочую температуру более чем на четыре градуса.

В части режимов работы макетного образца на фазовом переходе галлия, при температуре теплообменника 34 °С плато при плавлении практически отсутствует, что объясняется наличием паразитных потоков тепла, которые влияют на температуру излучающей полости помимо потоков тепла от ячейки, поддерживающих температуру полости за счет плавления галлия.

По результатам испытаний установлено, что при данной конструкции ячейки наибольшая продолжительность плато и его стабильность наблюдаются при температуре теплообменника 32°С. В связи с этим представляется целесообразным использовать режим плавления 32 °С при проведении работ по созданию бортового излучателя.

В результате испытаний и исследований макетных образцов МЧТ на фазовых переходах веществ установлено следующее:

- при температуре теплообменника ($32 \pm 0,1$) °С длительность плавления Ga составляет 310 минут;

- при температуре теплообменника ($17 \pm 0,1$) °С длительность плавления GaIn составляет 240 минут;

при температуре теплообменника в пределах ($22 \pm 0,1$) °С длительность плавления GaSn составляет 220 минут.

Плавление веществ начинается через 24 минуты – Ga; GaIn – через 20 минут; Ga Sn – через 20 минут.

Стабильность температуры не превышает: для Ga – 29 мК; GaIn –36 мК; Ga Sn– 38 мК.

Вместе с тем галлий обладает свойством переохлаждения, в котором он может находиться до температуры, равной минус 40 °С. В таком случае при начале работы необходимо убедиться, что рабочее вещество находится в кристаллизованном состоянии. Однако в процессе испытаний отмечается недостаточность охлаждения макетного образца до температуры минус 10 °С, при этом обеспечивается кристаллизация рабочего вещества, что достигается полученными технологиями заполнения рабочим веществом полости бортового излучателя.

Наряду с необходимостью подтверждения характеристик бортовой аппаратуры ДЗЗ, для уменьшения погрешности получаемых данных необходимо измерять параметры СВА КА, что является особенно актуальным для исследований в ультрафиолетовом и видимом диапазоне спектра излучения. При этом используемая аппаратура должна применяться в широком температурном диапазоне. Однако, как известно, ОЭА имеет существенную зависимость результатов измерений от значения температуры при проведении измерений [7]. В работе представлены результаты исследований по температурной компенсации высокостабильных фотометров, применение которых позволит повысить точность результатов измерений. Особенности их конструкции представлены в [8].

Результаты измерений выходного сигнала фотометра ($U_{\text{вых ф.}}$) при различных значениях температуры приведены на рисунке 9. При реализации № 1 температура измерений фотометра составляет 10 °С, при реализации № 2 – 20 °С, № 3 – 30 °С.

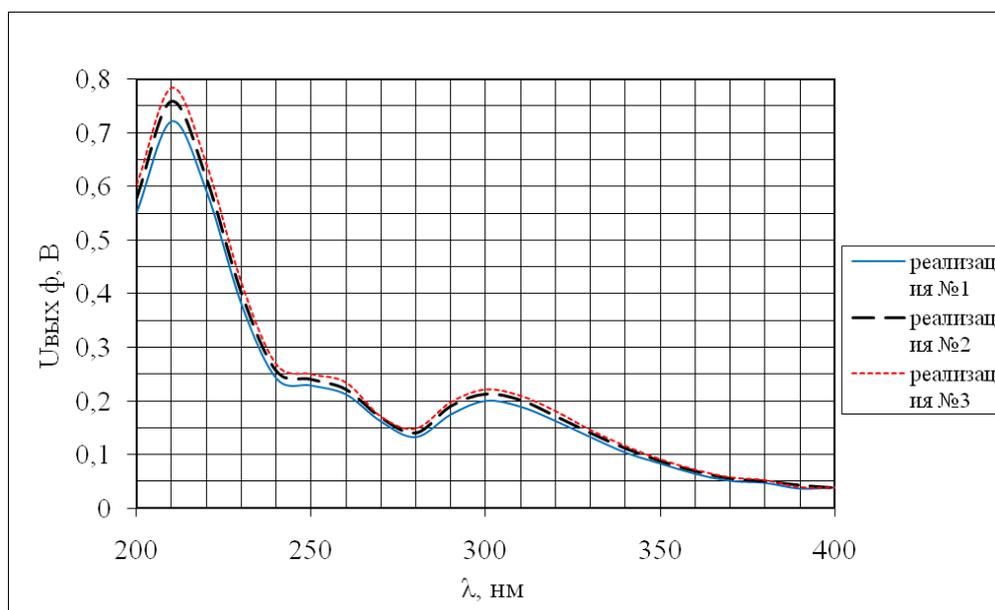


Рисунок 9 – Зависимость изменения выходного сигнала фотометра ($U_{\text{вых ф.}}$) от длины волны при различных температурах

Из рисунка видно, что при выполнении измерений при различных температурах окружающего пространства, значения выходного сигнала фотометра отличаются. При этом диапазон значений допустимых условий эксплуатации ОЭА составляет более 20 °С, следовательно, дополнительная погрешность влияния условий окружающей среды при проведении измерений достигает значений до 10 %. Для компенсации этого влияния проведены исследования температурной зависимости выходного сигнала, в результате получена функция изменения сигнала от температуры, которая может быть скомпенсирована программными или аппаратными средствами.

При получении функции зависимости элементов электрической схемы ОЭА на основе паспортных данных необходимо обеспечить наибольшее соответствие получаемой функции по результатам паспортных данных. При вычислении

коэффициентов температурной кривой применяется функция «ЛИНЕЙН» из Microsoft Excel или по полученным значениям строится график зависимости и добавляется линия тренда полученной функции.

В зависимости от вида кривой результат аппроксимации представляется целесообразным выражать в виде полиномиальной функции. Результаты аппроксимации температурной зависимости выходного сигнала полиномами различных порядков представлены на рисунке 10.

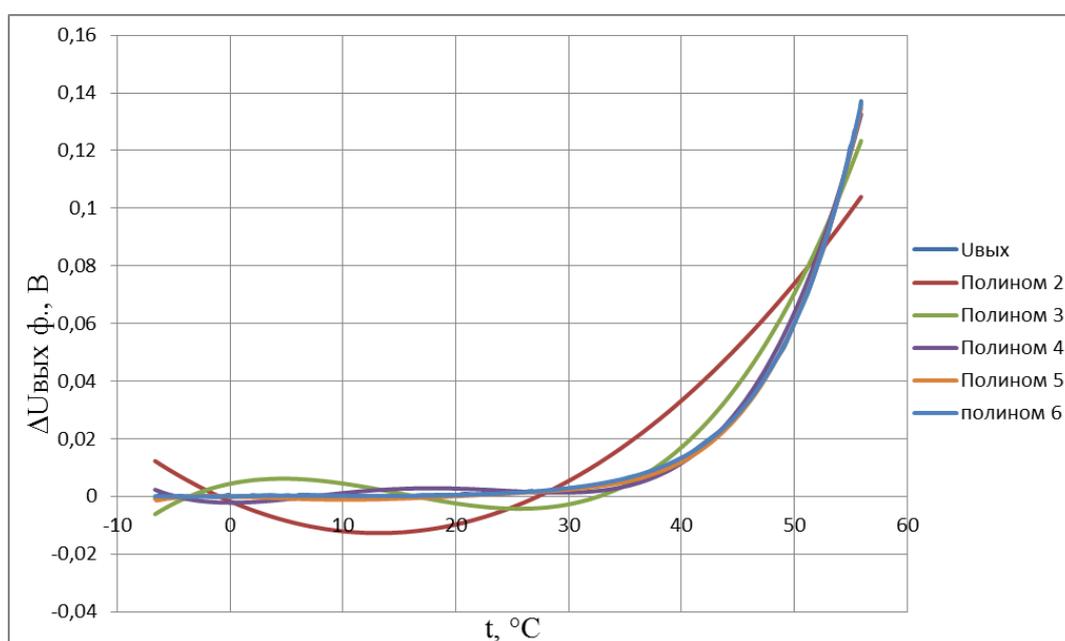


Рисунок 10 – Влияние функции аппроксимации на отклонение значений выходного сигнала фотометра

Из графика следует, что для компенсации температурной зависимости выходного сигнала необходимо использовать полиномиальные функции высоких порядков. При использовании полинома второго порядка отклонение от полученного результата достигает значений 0,25 В, что сопоставимо с суммарной дополнительной погрешностью выходного сигнала фотометра. Применение

полиномов степени, не ниже пятой, обеспечивает отклонение от расчётного значения не более 0,001 В, что является достаточным для компенсации температурной зависимости выходного сигнала и составляет менее 0,1 % выходного сигнала.

Полученные функции зависимости позволяют компенсировать дрейф результатов измерений фотометра от параметров внешних воздействий окружающей среды при исследовании СВА КА. При этом обеспечивается возможность оценивания и автоматической компенсации зависимости значений выходного сигнала в широком температурном диапазоне применения, что является актуальным при решении задач исследования СВА КА.

Для обеспечения корректировки зависимости результатов измерений от температуры в дальнейшем необходимо предусмотреть средства компенсации данной зависимости для получения достоверных результатов измерений ОЭА в широком диапазоне эксплуатационных температур.

Заключение

Применение явления фазовых переходов для решения задач бортовой калибровки является принципиально новым. Исследования показали, что использование в бортовых МЧТ высокочистых веществ позволит решить проблему бортовой калибровки аппаратуры ДЗЗ с прослеживаемостью результатов к национальным эталонам.

Новые подходы к разработке бортовых МЧТ обеспечили создание научно-технического задела по направлению калибровки перспективных приборов в

инфракрасном диапазоне спектра. По результатам проведённых теоретических и расчётно-экспериментальных исследований получены высокие значения характеристик бортовых излучателей: излучательная способность – 0,997, нестабильность воспроизведения температуры (в зависимости от применяемого эвтектического соединения галлия) от 0,03 до 0,04 К.

Результаты исследований показали возможность создания бортовых излучателей на фазовых переходах веществ в инфракрасном диапазоне спектра с высокими метрологическими характеристиками. В работе исследован характер процессов, возникающих в высокочистом веществе при различных режимах работы, определены требуемые режимы эксплуатации излучателей и ожидаемое энергопотребление. Также определены режимы работы МЧТ, оценена длительность поддержания температуры фазовых переходов. По полученным результатам длительность плавления веществ составляет сотни минут, что является весьма положительным эффектом при их использовании для бортовой калибровки. При этом выявлена необходимость изучения радиометрических характеристик в условиях космического пространства и совершенствования конструкции в связи с изменяющимся объёмом вещества в процессе фазового перехода.

В части исследований температурной зависимости ОЭА, применяемой для исследования СВА КА, полученные результаты показывают необходимость исследования и оценивания характеристик датчиковой аппаратуры на этапе разработки аппаратуры для повышения точности результатов измерений в широком диапазоне температур. При этом, для компенсации выходных характеристик ОЭА при построении функции температурной зависимости результатов измерений с

погрешностью, не превышающей 0,001 В, необходимо применять полиномиальную функцию со степенью, не ниже пятой при сложном виде температурной кривой.

Продолжение работ по созданию бортовых средств подтверждения точностных характеристик аппаратуры ДЗЗ позволит увеличить апертуру излучателей, расширить температурный диапазон применения, уменьшить температурную зависимость результатов, совершенствовать режимы работы с учётом условий космического пространства, что обеспечит подтверждение данных на весь период активного существования аппаратуры ДЗЗ.

Завершение работ по данному направлению позволит впервые в мировой практике открыть направление бортовой калибровки аппаратуры с прослеживаемостью результатов к национальным эталонам, что обеспечит высокое качество получаемых данных и признание получаемых данных международным сообществом.

Библиографический список

1.Крюков А.В. Курилёнок К.В., Полунин С.П., Крюков А.В. Реперные точки в составе калибраторов температуры КТ-500 и КТ-650 // Измерительная техника. 2007. № 6. С. 57-59.

2.Акишин А.И. Воздействие собственной внешней атмосферы космических аппаратов на их материалы и оборудование // Перспективные материалы. 2007. № 2. 2007. С. 14-22.

3.Лохматкин В.В. Модели для оценки показателей целевой эффективности космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с учётом надёжности

<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=49228>

4.Зуев А.В., Рожков В.А. Низкотемпературный излучатель для поверки и калибровки радиационных термометров // Измерительная техника. 2013. № 7. С. 50-52.

5.Винокуров Д.К., Копяткевич Р.М. Определение характеристик модели абсолютно черного тела на основе фазового перехода галлия // Космонавтика и ракетостроение. 2016. № 5 (90). С.151-157.

6.Карпунин Д.Н. Митрофанов В.Д., Федотов А.П. Современные подходы к проблеме совершенствования средств метрологического обеспечения перспективной аппаратуры дистанционного зондирования Земли // Космонавтика и ракетостроение. 2016. № 6 (91). С.94-101.

7.Бойправ О.В., Борботько Т.В., Лыньков Л.М. Влияние температуры на характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения перлитосодержащих экранов // Труды МАИ, 2014, № 75:

<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=49710>

8.Карпунин Д.Н., Киселев Ю.В., Маколкин Е.В. Проблемы калибровки аппаратуры дистанционного зондирования Земли и контроля околообъектовой среды космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2013. № 4 (73). С. 163-168.