

Вопросы создания объединенного метрологического центра коллективного пользования для калибровки ИК аппаратуры ДЗЗ

С.М. Беднов¹, Ю.М. Головин¹, Ф.С. Завелевич¹, Ю.П. Мацицкий¹,
С.А. Огарев², А.С. Панфилов², М.Л. Самойлов², В.И. Саприцкий², Б.Б. Хлевной²

¹ФГУП "Исследовательский центр имени М.В. Келдыша" (ФГУП "Центр Келдыша")
125438, Москва, ул. Онежская, 8
E-mail: kerc@elnet.msk.ru

²Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений (ВНИИОФИ)
119361, Москва, ул. Озерная, 46
E-mail: panfilov-m4@mail.ru

Применение данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в количественных методах решения социально-экономических и научных задач, особенно в таких областях, как климатология и метеорология, требует прецизионной радиометрической калибровки бортовой аппаратуры. Уровень имеющейся в стране калибровочной базы не отвечает современным требованиям, что снижает качество получаемой информации и эффективность материальных затрат на создание космических комплексов. В тепловом ИК диапазоне длин волн высокая точность калибровочного оборудования должна сочетаться с имитацией при калибровке реальных условий функционирования аппаратуры на орбите (вакуум, фоновый режим). Для создания такого оборудования предлагается объединить имеющийся научно-технический потенциал ФГУП "Центр Келдыша" и ВНИИОФИ. Стенд тепловакуумных испытаний (СТВИ) ФГУП "Центр Келдыша" можно использовать как базу объединенного метрологического центра коллективного пользования для калибровки ИК аппаратуры ДЗЗ. Более трех десятилетий ВНИИОФИ разрабатывает и производит эталонные излучатели в виде прецизионных моделей черных тел (МЧТ), работающие в широких диапазонах длин волн и температур. Представлены характеристики СТВИ и МЧТ, которые могут быть использованы в установке, приведены результаты первых экспериментов по включению эталонной МЧТ в состав СТВИ.

Введение

Всемирной метеорологической организацией (ВМО) сформулированы требования к основной спутниковой метеоинформации на период после 2000 г., которые включают получение:

- высотных профилей температуры с повышенным вертикальным разрешением (1,5 – 3 км в тропосфере и нижней стратосфере, 15 стандартных слоев) и допустимой погрешностью 1 – 2 К;
- профилей влажности в тропосфере с разрешением 2,5 км по высоте и погрешностью до 20 %.

Для обеспечения требований ВМО погрешность измерения спектральной яркости объекта в терминах эквивалентной температуры должна составлять $\leq 0,5$ К, что предъявляет высокие требования к качеству (точности) бортовой и наземной радиометрической градуировки ИК аппаратуры.

Методы бортовой калибровки с использованием моделей черного тела с излучательной способностью $\varepsilon \geq 0,99$ и точностью поддержания температуры $\sim 0,2$ К известны и отработаны в России и за рубежом. В частности, ФГУП "Центр Келдыша" при активной технической поддержке "НТЦ оперативного мониторинга Земли" (руководитель работ Л.А. Пахомов) создал экспериментальный образец бортового калибровочного источника большой апертуры (диаметр 78 мм), предназначенного для бортовых спектрометров высокого спектрального разрешения, в том числе для разрабатываемого для КА "Метеор-М" инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 [1, 2]. Расчетная оценка степени черноты для изготовленного экспериментального образца дает величину степени черноты не ниже 0,995. Результаты измерений тепловизором полей температуры показали, что неравномерность составляет не более 0,1-0,2 град.

К наземной градуировке ИК аппаратуры предъявляются высокие требования как в плане обеспечения воспроизводимости спектральной яркости излучения с помощью рабочих эталонов излучения требуемой точности, так и в плане воспроизводимости условий измерений (вакуум, низкая (~ 80 К) температура приемника, реальный тепловой режим прибора и др.).

В настоящее время стендовая база, отвечающая современным требованиям, в России отсутствует. Установки, в которых отсутствие вакуума заменяется подачей в зону измерений сухого азота, не решают проблемы. "Азотные" установки даже при высокой чистоте азота не исключают образование конденсата на холодных элементах аппаратуры, прежде всего на приемнике, что может приводить к неприемлемым искажениям градуировочной характеристики прибора.

Современная стендовая база градуировки бортовой ИК аппаратуры не обеспечивает выполнение требований ТЗ на аппаратуру в части погрешности измерения спектральной яркости объекта. Это существенно снижает качество получаемой спутниковой информации и эффективность материальных затрат на создание космических комплексов. Затраты на создание отраслевого центра радиометрической градуировки ИК аппаратуры несопоставимы с материальными потерями от некачественной спутниковой информации.

Стенд тепловакуумных испытаний

В Центре Келдыша в рабочем состоянии находится стенд тепловакуумных испытаний (СТВИ), который на протяжении многих лет использовался для испытаний различных космических объектов, включая малые КА. Вакуумный стенд СТВИ оснащен охлаждаемыми жидким азотом криопанелями, имитаторами Солнца и Земли, что в принципе позволяет воспроизводить условия работы аппаратуры на орбите.

Общий вид стенда представлен на Рис. 1. Основным элементом стенда является вакуумная камера в виде разборного горизонтального цилиндра длиной 6м и диаметром корпуса 2,2м (объем 25м³), снабженная охлаждаемыми жидким азотом черными экранами, высоковакуумной системой откачки и узлом поворота изделия, помещаемого в камеру. Имитатор солнечного излучения создает пятно диаметром около 1 м. Камера снабжена выводами для датчиковой аппаратуры (температуры, давления и т.д.). Для обеспечения работы модели черного тела камеру оснастили гидроразъемами для подвода теплоносителя.

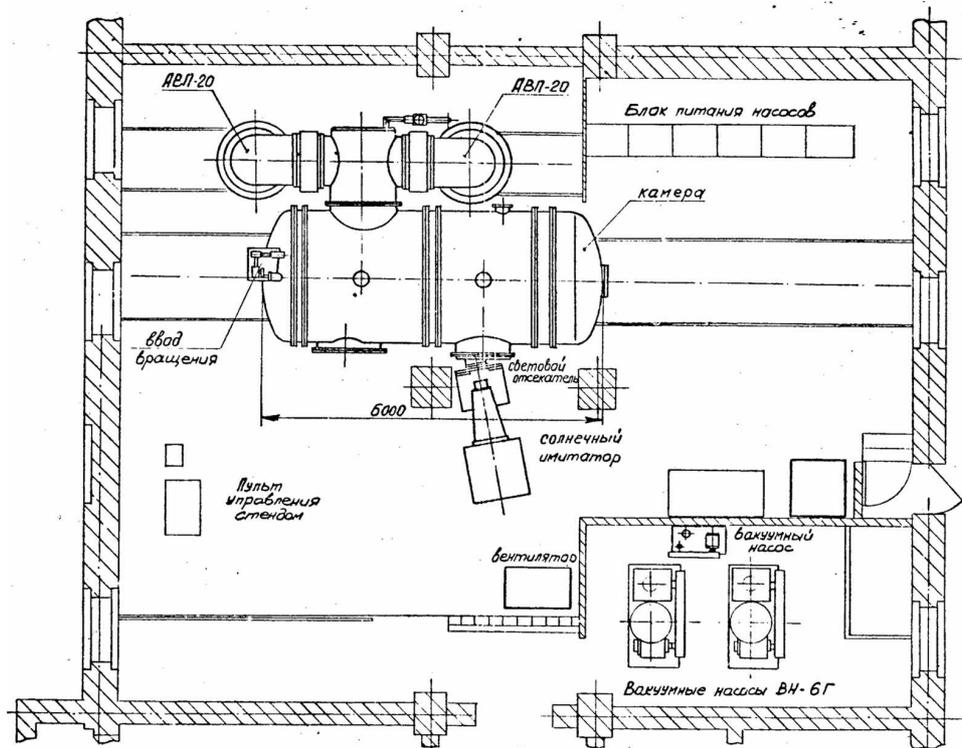


Рис.1. Общий вид стенда СТВИ

Основные параметры СТВИ представлены в Таблице 1

Таблица 1. Основные параметры СТВИ

Параметр	Норма
Предельное разряжение в камере без объекта	$2 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст.
Рабочее давление в камере при исследовании объекта с натеканием $2 \cdot 10^{-2}$ л·мм.рт.ст./с - при работе с паромасляными насосами (с азотными ловушками)	$1 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст.
Время откачки объёма с содержащимся в нем газыделяющим объектом до давления $1 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст.	43(+10)мин.
Температура поверхности азотных экранов при условии съема 5кВт тепла с испытуемого объекта	не выше 100К
Степень черноты азотных экранов	не ниже 0.95
Время выхода камеры на рабочий режим по температуре азотных экранов	не более 2ч
Система азота – два азотных танка ТРЖК-3 с суммарным объёмом 12т	Время непрерывной работы по азоту на двух танках 48ч
Расход азота - на режиме захлаживания - на рабочем режиме	2 т/ч 250 кг/ч
Система вращения модели в камере – однокоординатный вертикальный подвес с автоматическим поддержанием непрерывного вращения модели (вес до 300кг) - рабочий ход - возвратный (во избежании закручивания и обрыва измерительных проводов и электрокабелей)	от 1об/мин до 1об за 24ч 1об/мин
Система выводов измерительных проводов - для термопар - для других датчиков	безразрывные герморазъёмы стандартные
Система регистрации показаний датчиков	Стандартные приборы, ПЭВМ
Подведенная электрическая мощность	200 кВт
Подведенный расход воды	5000 кг/ч

Параметры имитатора Солнца:

- плотность солнечного потока от 0,8 до 3 кВт/м² (от орбиты Марса до орбиты Венеры);
- угол расходимости $1^{\circ}30'$;
- спектр излучения – спектр газа ксенона при высоком давлении и температуре (для корректировки спектра имеется специальный интерференционный фильтр);
- однородность $\pm 5\%$;
- стабильность не хуже 2% за срок службы лампы (150 ч);
- размер рабочей зоны $\varnothing 0,9$ м;

Для создания стенда радиометрической градуировки ИК аппаратуры стенд СТВИ будет оснащен эталонным источником излучения, имитатором "холодного" космоса, арматурой для крепления бортовой аппаратуры, системами измерения и управления. Планируется проведение метрологической аттестации стенда.

Модель черного тела

Эталонный источник излучения (Рис. 2) - высокоточная модель черного тела (МЧТ) разработана ВНИИОФИ. Представляет собой полостное черное тело с апертурой 100 мм. К внешней поверхности цилиндра припаяны трубки, по которым циркулирует теплоноситель - высокочистое силиконовое масло. Термостат обеспечивает работу МЧТ в диапазоне температур $-30...+80$ градусов Цельсия. Контроль температуры МЧТ осуществляется четырьмя прецизионными платиновыми термометрами сопротивления.

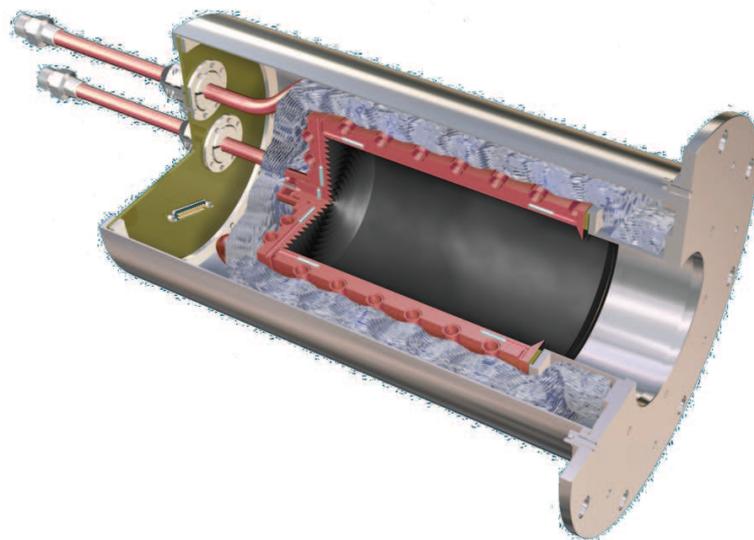


Рис. 2. МЧТ в разрезе

Основные технические характеристики АЧТ представлены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики модели АЧТ ВВ100V1

Диапазон рабочих температур	$-30...80$ °С (240...350К)
Внешние габариты корпуса (Длина × диаметр)	500 × 214 мм
Диаметр полости АЧТ	120 мм
Глубина полости АЧТ	200 мм
Апертура	100 мм
Термостатирование	внешний термостат LAUDA Proline RP1845
Точность поддержания температуры	0,1 °С
Общая (допустимая) длина шлангов, соединяющих камеру с внешним жидкостным термостатом RP1845	2 × 10 м
Время выхода на заданную температуру	не более 1,5 ч
Встроенные термометры	2-5 шт. × 100 Ω резисторы PRT
Материал полости АЧТ	медь, окрашенная
Потребляемая мощность (с внешним жидкостным термостатом RP1845)	1,6...3,5 кВт

МЧТ была испытана на СТВИ в условиях вакуума при температуре азотных экранов 80 К. Максимальная неизотермичность дна не превышает 0,04 К, боковой поверхности 0,1 К. Эффективная степень черноты с учетом полученной неизотермичности оказалась выше 0,996.

Результаты измерения полей яркости, полученных тепловизором АГА-780 (Рис. 3), показали, что неоднородность по апертуре составляет не более 0,1 градуса.

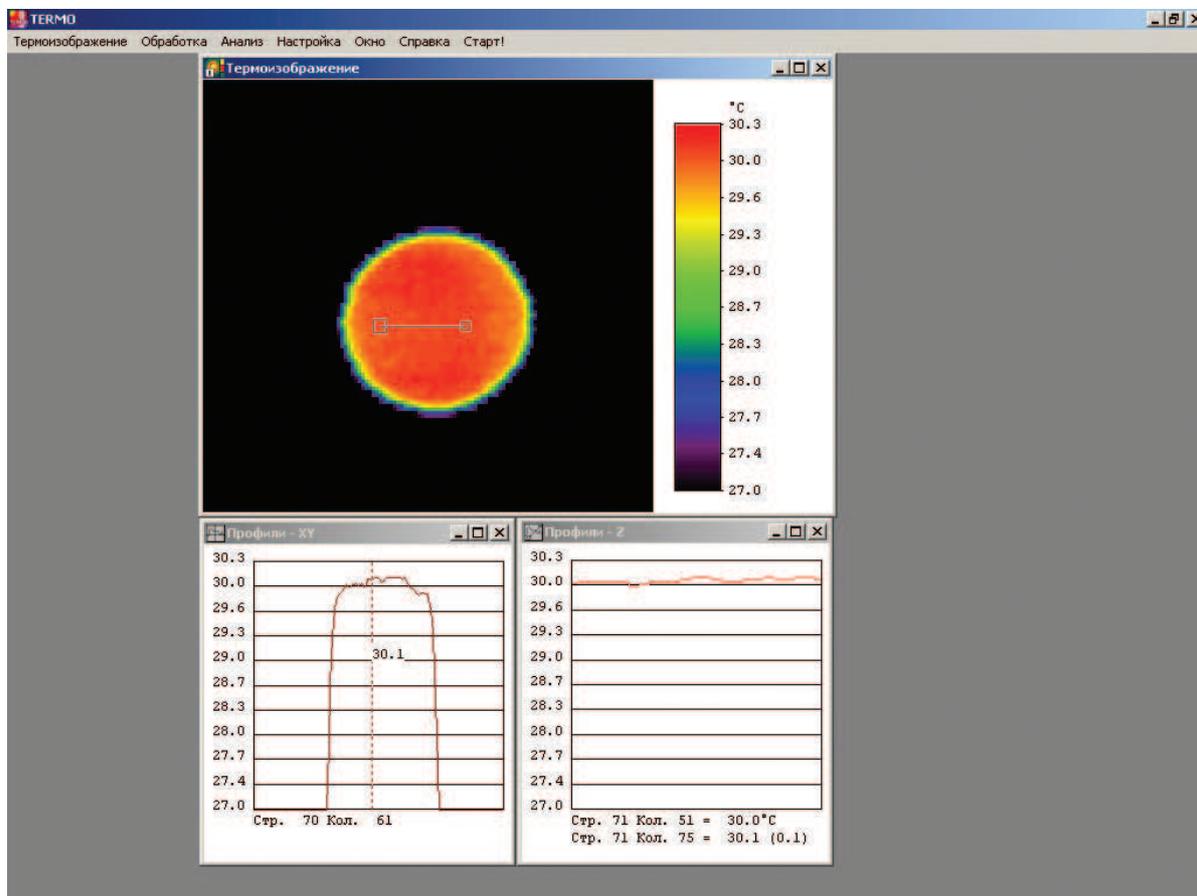


Рис. 3. Распределение температуры по апертуре МЧТ

Модель "холодного" черного тела

Существенное влияние на точность измерений ИК аппаратуры оказывает собственное излучение прибора. При измерениях прибор фиксирует "полезное" излучение объекта (атмосферы) и "паразитное" собственное излучение прибора. Для обеспечения требуемой радиометрической погрешности при измерениях и при градуировке собственное излучение прибора должно быть измерено и вычтено из суммарного сигнала.

При работе в космическом пространстве имеется возможность периодически направлять поле зрения прибора на "холодный" космос ($T \approx 4$ К), измеряя при этом собственное излучение прибора и вычитая его из суммарного сигнала при обработке результатов.

При наземных измерениях и при градуировках имитатором "холодного" космоса служит разработанная ФГУП "Центр Келдыша" при участии ВНИИОФИ модель "холодного" черного тела (Рис. 4) при температуре жидкого азота (77 К).

Модель (Рис. 4) представляет из себя полостное ЧТ с отношением диаметра входной диафрагмы к длине полости $D_d/L_{\text{п}} = 0,5$. Стенки (4) полости – двойные, выполнены из стали X18H9T и заливаются жид-

ким азотом при $T=77.2^{\circ}\text{K}$. Днище (3) ЧТ представляет из себя узел, состоящий из двух монолитных медных плит плотно соединенных между собой. Внутренняя (со стороны полости) часть днища выполнена в виде системы концентрических колец (в поперечном сечении - гребенка, каждый зубец которой – треугольник с углом при вершине $\alpha = 60^{\circ}$ и высотой $h = 4\text{ мм}$, с шагом между вершинами $\delta = 5\text{ мм}$).

Внешняя сторона днища охлаждается жидким азотом и имеет фрезерованные каналы прямоугольного сечения $14\times 4\text{ мм}$, соединенных между собой, с общей длиной $L = 800\text{ мм}$.

Для захлаживания ЧТ жидким азотом и удаления образовавшейся при этом газообразной фазы разработана схема прокачки азота. Через входную трубу $M 22\times 15$ (6) азот поступает в нижнюю часть днища (3), заполняя ее снизу вверх. После этого, через обводную трубку (26) азот поступает в полость стенки (4) и заполняет ее также снизу вверх, вытесняя газообразную фазу через выходную трубу (5). Таким образом, происходит процесс захлаживания и удаления образовавшейся газообразной фазы. Такая схема захлаживания позволяет обеспечить равномерное поле температур ($\sim 77,2^{\circ}\text{K}$) по всей внутренней полости ЧТ. Контроль температуры ЧТ осуществляется за счет установленных на днище (3) двух плёночных термометров сопротивления ТМ-344 (25), обеспечивающих погрешность измерения температуры не более $\Delta T < 0,1^{\circ}$. В полости между холодным внутренним корпусом (1) и закреплённых на фланцах (7) и (8) теплым кожухом (2) для уменьшения теплопритоков снаружи располагаются маты экранно-вакуумной теплоизоляции ЭВТИ-В. Для увеличения степени черноты, внутренняя полость ЧТ покрывается черной эмалью АК-512 ГОСТ 23171-78.

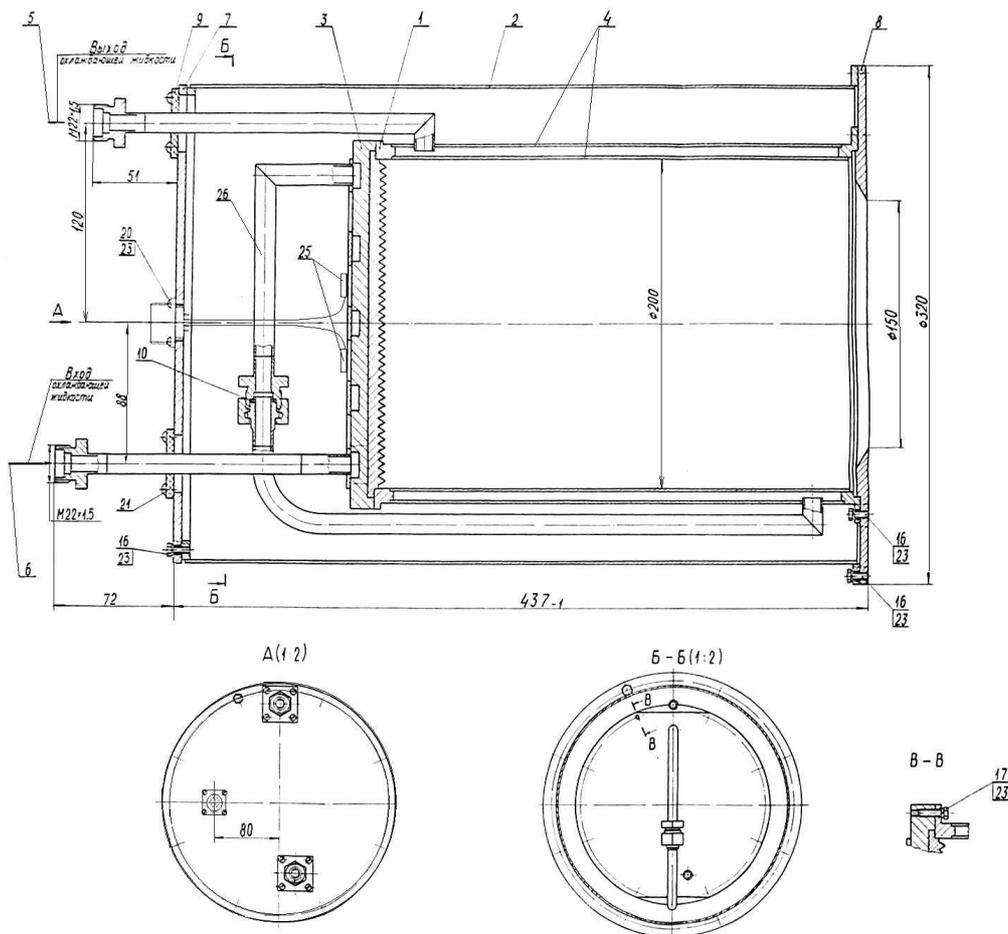


Рис. 4. Модель "холодного" черного тела

Заключение

На базе вакуумного стенда (СТВИ) ФГУП "Центр Келдыша" и созданной ВНИИОФИ прецизионной модели черного тела (МЧТ), работающей в широких диапазонах длин волн и температур предложено создать объединенный метрологический центр коллективного пользования для калибровки ИК аппаратуры ДЗЗ.

Испытания МЧТ на СТВИ продемонстрировали возможность обеспечения воспроизводимости спектральной яркости излучения с помощью рабочих эталонов с требуемой точностью при имитации близких к реальным условий измерений (вакуум, низкая (~ 80 К) температура приемника, реальный тепловой режим прибора и др.).

Литература

1. Головин Ю.М., Завелевич Ф.С., Мащицкий Ю.П. и др. "Бортовой фурье-спектрометр для термического и влажностного зондирования атмосферы". III Международная конференция-выставка. Малые спутники: новые технологии, миниатюризация, области эффективного применения в XXI веке. г. Королев Московской области. 27мая – 31 мая 2002 г.
2. Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Десятов А.В. и др. Фурье-спектрометр для дистанционного зондирования атмосферы Земли (в настоящем сборнике).