

УДК 629.78.018

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УДЕЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ МАТОВ ЭВТИ

© 2019 г. В. А. Баранчиков^{1, *}, А. А. Басов¹, М. А. Клочкова¹¹Публичное акционерное общество “Ракетно-космическая корпорация “Энергия”
им. С.П. Королёва”, Королёв, Россия

*e-mail: post@rsce.ru

Поступила в редакцию 12.02.2019 г.

После доработки 08.04.2019 г.

Принята к публикации 18.04.2019 г.

В настоящей статье рассматриваются вопросы верификации теплоизоляционных свойств экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ), применяемой в качестве пассивных средств в системах обеспечения теплового режима космических аппаратов. Рассмотрено многообразие различных конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, оказывающих суммарное влияние на теплоизоляционные свойства мата ЭВТИ. Изложены методологические принципы автономных испытаний по оценке и сравнению качества теплоизоляции исследуемых образцов матов ЭВТИ. Определены технические требования к экспериментальной установке, укомплектованной составом оборудования имеющегося на экспериментальной базе РКК “Энергия”. При испытаниях на специальной экспериментальной установке верифицирована методика определения гарантированного диапазона действительных значений удельного термического сопротивления образцов матов ЭВТИ. Обоснована необходимость применения данного метода испытаний для исследования новых перспективных беспылевых материалов в составе матов ЭВТИ.

Ключевые слова: экранно-вакуумная тепловая изоляция (ЭВТИ), степень черноты, коэффициент поглощения солнечного излучения, теплопроводность, удельное термическое сопротивление (УТС)

DOI: 10.1134/S0002331019020055

ВВЕДЕНИЕ

Надежное функционирование всех систем космического аппарата (КА) обеспечивается поддержанием допустимого теплового режима с помощью специальной бортовой системы – системы обеспечения теплового режима (СОТР).

Экранно-вакуумная тепловая изоляция (ЭВТИ) является одним из важнейших пассивных средств СОТР [1]. Качественная тепловая защита элементов конструкции КА с помощью матов ЭВТИ позволяет:

- уменьшить тепловые потери и тем самым снизить тепловую нагрузку на КА;
- активизировать лучистые и кондуктивные связи во внутреннем объеме КА увеличивая тепловую инерционность элементов конструкции КА;
- уменьшить амплитуду колебания температуры элементов конструкции при периодических изменениях внешней тепловой нагрузки.

Теплоизоляционные свойства ЭВТИ существенно зависят от конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов. Поэтому особо важную роль приобретает надежная конечная оценка этих свойств путем расчетно-теоретических методов в

сочетании с экспериментальной отработкой по верификации гарантированного диапазона возможных действительных значений удельного термического сопротивления матов ЭВТИ. В этом случае общая проектная и экспериментальная надежность СОТР гарантированно подтверждается для экстремальных условий внешнего и внутреннего теплообмена КА:

– при отработке “холодного” расчетного случая используются значения нижней границы гарантированного диапазона удельного термического сопротивления матов ЭВТИ;

– при отработке “горячего” расчетного случая используются значения верхней границы гарантированного диапазона удельного термического сопротивления матов ЭВТИ.

МАТЫ ЭВТИ И ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КАЧЕСТВО ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ

В действующей нормативной документации [2], [3] и в целом ряде опубликованных статей предлагаются попытки нормирования удельного термического сопротивления (УТС) для отдельных марок ЭВТИ в зависимости от дифференцированного влияния различных факторов, так, например:

– отраслевой стандарт [2] таблично регламентирует значения УТС отдельных марок ЭВТИ дифференцированно по таким факторам как диапазон рабочих температур, внутреннее давление в слоях ЭВТИ, плотность укладки слоев, степень перфорации;

– в работе [4] предлагается оценка влияния погрешности моделирования внешних тепловых потоков и степени обжатия пакета ЭВТИ на теплоперенос через экранно-вакуумную теплоизоляцию.

В действующей нормативной документации [2] и [3] не предусмотрены объективные методы верификации удельного термического сопротивления матов ЭВТИ (после их изготовления и хранения перед установкой на КА), а осуществляется только визуальный контроль при поэтапном выполнении технологического процесса изготовления и сборки матов ЭВТИ.

Поэтому для повышения надежности обеспечения теплового режима, перед установкой на изделие изготовленного комплекта матов ЭВТИ необходимо осуществлять выборочную проверку образцов матов ЭВТИ на соответствие нормативным требованиям по удельному термическому сопротивлению с помощью объективных методов верификации действительных значений удельного термического сопротивления.

МЕТОДИКА ВЕРИФИКАЦИИ КАЧЕСТВА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ МАТОВ ЭВТИ

Основные положения верификации

Учитывая актуальность вопроса по оценке качества теплоизоляции матов ЭВТИ, разработана методика тепловакуумных испытаний (ТВИ) по определению удельного термического сопротивления образцов матов ЭВТИ с применением имеющегося оборудования на экспериментальной базе РКК “Энергия”.

При разработке методики приняты следующие основные положения верификации:

– тепловакуумные испытания полноразмерных матов ЭВТИ, выполненных по штатной конструкторской документации (КД), с практической точки зрения трудно реализуемы и слишком дорогостоящие;

– оборудование и оснастка экспериментальной установки должны быть унифицированы для испытания ЭВТИ различных марок;

– в качестве объектов испытания должны использоваться специально разработанные образцы-свидетели матов ЭВТИ (соответствующие штатной марке и технологии изготовления) с унифицированными размерами фронтальной поверхности, соответствующими посадочным поверхностям на экспериментальной установке (ЭУ);

– методологические алгоритмы (с учетом принятых допущений) должны реализовывать расчетное определение гарантированного диапазона изменения действитель-

ных значений удельного термического сопротивления для образцов-свидетелей матов ЭВТИ при моделировании типовых граничных условий штатной эксплуатации;

– реализация методологического принципа верификации должна осуществляться путем одновременного сравнительного испытания двух образцов-свидетелей матов ЭВТИ, один из которых является “эталонным” (ранее апробированная марка ЭВТИ), а второй “исследуемым” (новая марка ЭВТИ) при прочих равных граничных условиях эксплуатации в составе ЭУ, при этом реализуется возможность как качественного, так и количественного сравнительного анализа теплоизоляционных характеристик.

Цель и задачи испытаний

Цель ТВИ заключается в сравнении эффективности теплоизоляционных свойств различных образцов-свидетелей матов ЭВТИ, отличающихся по составу применяемых материалов и технологическому процессу их изготовления.

Поставленная цель реализуется при решении следующих задач:

– методологическое определение гарантированного расчетного диапазона действительных значений удельного термического сопротивления в зависимости от температурного уровня испытываемых образцов-свидетелей ЭВТИ при моделировании типовых граничных условий штатной эксплуатации;

– анализ результатов верификации и выдача заключения по вопросу применимости наиболее эффективной марки ЭВТИ для регламентированного диапазона температуры элементов конструкции изделия.

Необходимо отметить, что методика предусматривает оценку результатов испытаний для образцов-свидетелей ЭВТИ находящихся в свободном, не обжатом состоянии. При этом априорно принимается одинаковая степень влияния технологических и эксплуатационных факторов на значение удельного термического сопротивления для сравниваемых образцов ЭВТИ в процессе последующего технологического цикла подготовки к началу ТВИ изделия.

Отличительные особенности испытаний

В процессе проведения испытаний подвергается исследованию нижеследующая область теплофизических характеристик ЭВТИ и граничных условий на момент условного достижения стационарного теплового режима:

– исследуемый диапазон удельного термического сопротивления объектов испытаний в вакуумном пространстве регламентируется нормативной документацией в диапазоне от 5 до 50 м² К/Вт;

– исследуемая область определения температуры на граничных поверхностях ЭВТИ от минус 170 до плюс 70°С;

– исследуемая плотность теплового потока через образцы ЭВТИ оценивается на уровне от 5 до 48 Вт/м², при этом уровень потребляемой мощности электронагревательных пластин для малоразмерных образцов ЭВТИ (~0.12 м²) составляет ориентировочно от 0.6 до 6.0 Вт.

Определение опытным путем термического сопротивления малоразмерных образцов ЭВТИ (по сравнению с полноразмерными матами ЭВТИ, устанавливаемыми на КА) в вакуумном пространстве характеризуется следующими отличительными особенностями:

– в процессе испытаний необходимы измерения мощности, проходящей через ЭВТИ и измерение перепада температуры по толщине мата на момент условно достигнутого стационарного состояния при назначенных типовых граничных условиях с обеих сторон мата. При этом, особое внимание должно уделяться определению критерия достижения стационара;

– измерение мощности, проходящей через ЭВТИ, осуществляется косвенным образом путем измерения электрической мощности нагревателя, устанавливаемого на внутренней поверхности двухстороннего мата ЭВТИ за вычетом расчетного значения суммарных тепловых потерь;

– определение перепада температуры по толщине образцов ЭВТИ осуществляется косвенным образом с использованием расчетных формул, полученных из решения системы уравнений теплового баланса (при принятых допущениях).

Состав и конфигурация экспериментальной установки (ЭУ)

Конфигурация ЭУ, разработанной для верификации удельного термического сопротивления образцов-свидетелей матов ЭВТИ, представлена на рис. 1.

ЭУ укомплектована следующим оборудованием и технологической обвязкой:

- тепловакуумная камера 1 с системой вакуумирования;
- технологический мат ЭВТИ 6, установленный на внутренней поверхности не охлаждаемой крышки термобарокамеры (ТБК);
- технологическая оснастка 2 и 10 для размещения и крепления объектов испытаний во внутреннем объеме ТБК;
- технологические датчики температуры 3, 4, 7, 8 и 12, установленные на элементах конструкции ТБК, для контроля граничного условия по фоновой температуре окружающей среды объектов испытаний;
- нагревательные пластины (2 шт.), оснащенные наклеенными на них электроннагревателями и датчиками температуры 13 и 15 (по 3 шт. на каждой пластине) для контроля граничного условия на внутренней поверхности образцов ЭВТИ;
- объекты испытаний 14 и 16 в виде “эталонного” и исследуемого образцов ЭВТИ, при этом маты образцов обворачивают нагревательные пластины с двух сторон и сшиваются на торцевых кромках пластин, обеспечивая круговую теплоизоляцию пластины;
- кабельные сети 11 силового и измерительного питания оборудования;
- измерительно-вычислительная управляющая система технологическими процессами (ИВУСТП), обеспечивающая управление и контроль за работой служебных систем ТБК и управление программой испытаний.

Технические требования к оборудованию ЭУ

Достижение поставленной цели и задач испытаний обеспечивалось при выполнении ниже следующих технических характеристик, предъявляемых к ЭУ.

Моделирование типовых граничных условий “холодного космоса” (без облучения солнечным потоком) на наружной поверхности образцов-свидетелей матов ЭВТИ обеспечивалось при следующих характеристиках:

- остаточное давление во внутреннем объеме ТБК не более 1×10^{-5} мм рт. ст.;
- активное стабилизированное захлаживание внутренних поверхностей днища и цилиндрической обечайки криогенного экрана ТБК в диапазоне значений температуры от минус 190 до минус 185°С путем непрерывной прокачки жидкого азота через криогенный экран;
- применение пассивных средств термостатирования ТБК на внутренней поверхности крышки ТБК, позволяющих обеспечить значение температуры не более минус 130°С путем установки на крышке технологического мата ЭВТИ;
- степень черноты внутренних поверхностей ТБК не менее 0.92.

Моделирование типового граничного условия на внутренней поверхности образцов-свидетелей матов ЭВТИ обеспечивалось специально разработанной конструкцией нагревательных пластин, имитирующих теплоизолируемую поверхность с варьируемым значением температуры космического аппарата (КА). При этом конструкция обеспечивала выполнение следующих технических характеристик:

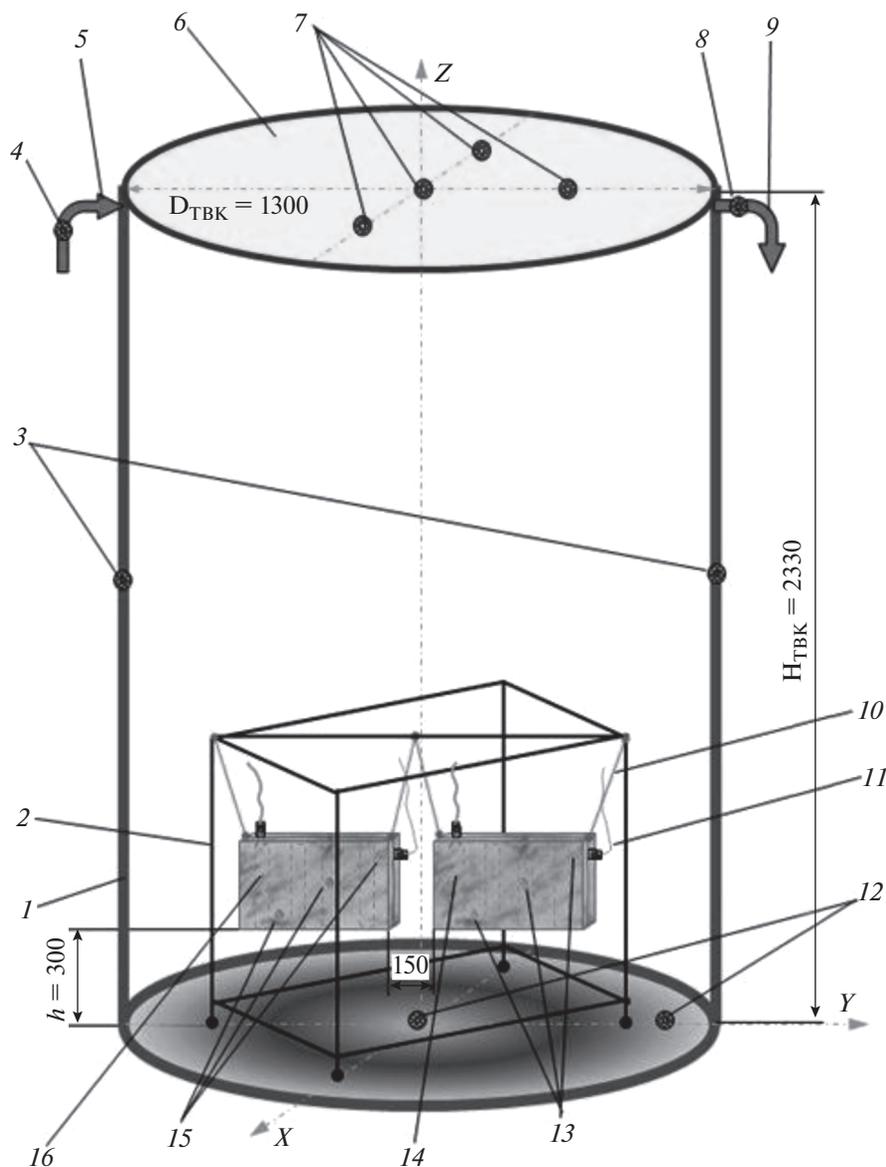


Рис. 1. Конфигурация ЭУ для верификации УТС образцов-свидетелей матов ЭВТИ: 1 – термобарокамера ВКЗ-1В; 2 – технологическая подставка; 3 – датчики температуры (ДТц1 и ДТц2), установленные на цилиндрической части ТБК; 4 – датчик температуры (ДТвх) жидкого азота на входе в ТБК; 5 – горловина подачи жидкого азота; 6 – технологический мат ЭВТИ, установленный на неохлаждаемой крышке ТБК; 7 – датчики температуры, установленные на внутренней поверхности технологического мата ЭВТИ (ДТк1–ДТк4); 8 – датчик температуры (ДТвых) жидкого азота на выходе из ТБК; 9 – горловина слива жидкого азота из ТБК; 10 – подвеска нагревательной пластины из арамидной нити; 11 – кабели силового питания ЭН и ДТ, установленных на нагревательных пластинах; 12 – датчики температуры (ДТд1, ДТд2), установленные на дне ТБК; 13, 15 – датчики температуры (ДТп1–ДТп3), установленные на нагревательной пластине (под образцами ЭВТИ); 14 – “исследуемый” образец-свидетель ЭВТИ, установленный на нагревательную пластину; 16 – “эталонный” образец-свидетель ЭВТИ, установленный на нагревательную пластину. Размеры указаны в мм.

– обоснованный выбор и оптимизация габаритных размеров нагревательной пластины с учетом обеспечения ее изотермичности и уменьшения относительной суммарной доли паразитных тепловых потерь, в том числе потерь по кабелям, потерь по торцевым прошивкам окантовки образцов-свидетелей матов ЭВТИ и потерь по элементам схемы обезвешивания и крепления объектов испытаний на технологической подставке;

– стационарная изотермичность нагревательной пластины обеспечивается путем равномерной наклейки электронагревателей по всей фронтальной поверхности;

– измеряемое значение степени черноты не менее 0.9 обеспечивается путем равномерного нанесения на пластину терморегулирующего покрытие типа эмали АК-512 черная.

Состав и размещение элементов конструкции ЭУ должны соответствовать требованиям схемы, представленной на рис. 1, обеспечивая при этом следующие технические характеристики:

– осесимметричное расположение испытываемых образцов-свидетелей матов ЭВТИ относительно осей системы координат ТБК, обеспечивая тем самым осесимметричную тепловую нагрузку на противоположных сторонах обоих образцов-свидетелей;

– обезвешивание нагревательных пластин с помощью системы подвесок из низко теплопроводной арамидной нити, обеспечивая тем самым устранение обжимающей нагрузки, действующей на образцы-свидетели.

Для обеспечения надежности испытаний технологический процесс сборки и подготовки ЭУ к испытаниям в обязательном порядке предусматривал выполнение следующих операций:

– предварительный этап технологического обезгаживания комплектующих элементов ЭУ, в том числе: двух образцов-свидетелей матов ЭВТИ, кабельных сетей, технологического мата ЭВТИ на крышке ТБК и двух нагревательных пластин с наклеенными электронагревателями и нанесенным терморегулирующим покрытием;

– окончательная “прошивка” программно-математического обеспечения (ПМО) по составу методологических параметров ЭУ, участвующих в реализации алгоритмов расчета, отладка и тестирование расчетных алгоритмов;

– цикл поэтапных электрических проверок схемы и контроль ПМО ИВУСТП.

В ходе последовательного выполнения операций программы и методики испытаний средствами ИВУСТП обеспечивалось выполнение следующих технических характеристик и операций:

– опрос измеряемых параметров с частотой не менее 1 Гц;

– регистрация всех измеряемых и рассчитываемых методологических параметров с привязкой к реальному времени;

– реализация алгоритмов расчета для пессимистической и оптимистической оценок гарантированного диапазона действительных значений удельного термического сопротивления;

– относительная погрешность измерения температурных параметров с учетом преобразования в цифровой код и дискретности отображения не более $\pm 1.0\%$ от диапазона изменения;

– абсолютная погрешность измерения потребляемой мощности не более 0.01 Вт обеспечивалась путем предварительной градуировки электрического сопротивления схемы соединения нагревателей (по показаниям амперметра и вольтметра стабилизированного источника постоянного тока) в заданном диапазоне температуры эксплуатации пластины от минус 170 до плюс 60°C и потребляемой мощности от 0.2 до 8 Вт;

– объективная оценка по достижению стационарного теплового режима объектов испытаний (при фиксированных варьируемых уровнях потребляемой электрической мощности) путем непрерывного вычисления градиента температуры нагревательной пластины при значении не более 1 К/ч и, в конечном итоге, по результатам вычис-

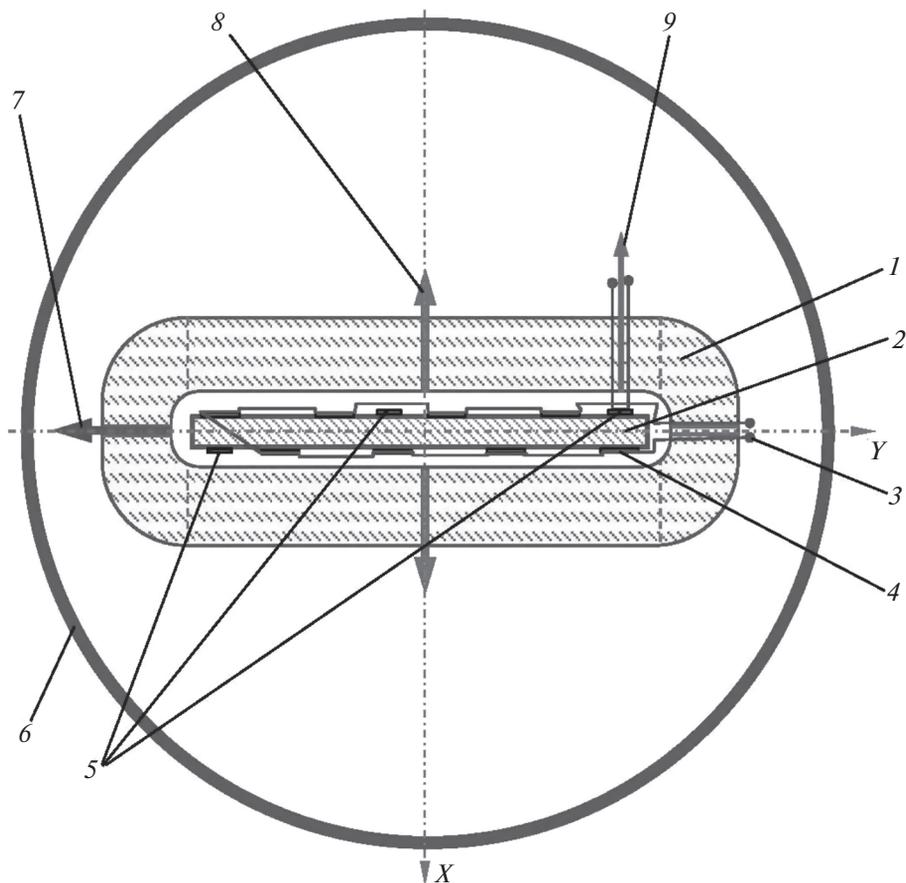


Рис. 2. Конструктивная расчетная схема теплового баланса объекта испытаний: (условно показано поперечное сечение одного объекта испытаний): 1 – образец-свидетель мата ЭВТИ; 2 – нагревательная пластина; 3 – электрическая схема соединения пленочных электронагревателей; 4 – наклеенные пленочные электронагреватели; 5 – датчики температуры (ДТп1–ДТп3); 6 – термобарокамера; 7 – $Q_{\text{БОК}}$, условный вектор тепловых потерь через окантовку образца-свидетеля; 8 – Q_{F} , условный вектор теплового потока через фронтальную поверхность ЭВТИ; 9 – $Q_{\text{КАБ}}$, условный вектор тепловых потерь по кабельной сети.

ления градиента удельного термического сопротивления при значении не более $0.05 \text{ м}^2 \text{ К}/(\text{Вт ч})$.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

На рис. 2 представлена конструктивная расчетная схема объекта испытаний, состоящего из образца-свидетеля мата ЭВТИ и нагревательной пластины. Математическая постановка методики испытаний формулируется при следующих допущениях:

– через фронтальные поверхности образцов-свидетелей, расположенные с обеих сторон нагревательной пластины, проходят одинаковые мощности теплового потока. Иными словами пакеты ЭВТИ, расположенные с обеих сторон нагревательной пла-

стины принимаются одинаковыми во всех отношениях, а также принимаются одинаковыми граничные условия на стенках ТВК с обеих сторон;

– тепловые потери по кабельной сети не учитываются (“ $Q_{\text{каб}} = 0$ ”). Данное допущение обеспечивает гарантированный расчетный запас по определению диапазона действительных значений удельного термического сопротивления;

– верхняя (оптимистическая) граница действительных значений удельного термического сопротивления определяется с учетом принятого допущения о существовании идеального теплового контакта между нагревательной пластиной и внутренним облицовочным слоем образца ЭВТИ, т.е. при равенстве температурных значений между этими элементами конструкции ЭУ;

– нижняя (пессимистическая) граница действительных значений удельного термического сопротивления определяется с учетом принятого допущения об отсутствии теплового контакта (кондуктивной связи) между нагревательной пластиной и внутренним слоем образца ЭВТИ, т.е. с учетом единственного лучистого способа теплопередачи между этими элементами конструкции ЭУ.

Стационарный тепловой баланс для объекта испытаний описывается ниже следующей системой уравнений.

Общий тепловой баланс объекта испытаний

$$N_{\text{ЭН}} = 2Q_{\text{Ф}} + Q_{\text{БОК}} + Q_{\text{КАБ}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{ЭН}}$ – электрическая мощность, потребляемая нагревательной пластиной, Вт;

$Q_{\text{Ф}}$ – тепловой поток, проходящий через фронтальную поверхность ЭВТИ, Вт;

$Q_{\text{БОК}}$ – тепловые потери через окантовку образца-свидетеля, Вт;

$Q_{\text{КАБ}} = 0$ – тепловые потери по кабельной сети объекта испытаний, Вт.

Мощность, передаваемая с нагревательной пластины на внутреннюю фронтальную поверхность ЭВТИ:

$$Q_{\text{Ф}} = \varepsilon_{\text{п-1}} \sigma F (T_{\text{п}}^4 - T_1^4), \quad (2)$$

где F – площадь фронтальной поверхности ОИ, м²;

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ Вт/(м² К⁴) – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$T_{\text{п}}$ – температура нагревательной пластины, К;

T_1 – температура внутреннего облицовочного слоя ЭВТИ, К;

$\varepsilon_{\text{п-1}} = \frac{1}{(1/\varepsilon_{\text{п}} + 1/\varepsilon_1 - 1)}$ – приведенная степень черноты между нагревательной пластиной и внутренним слоем ЭВТИ;

$\varepsilon_{\text{п}}$ – степень черноты нагревательной пластины;

ε_1 – степень черноты внутреннего облицовочного слоя ЭВТИ.

Мощность, переизлучаемая с наружной поверхности ЭВТИ на внутреннюю поверхность ТВК и определяемая по [5]:

$$Q_{\text{Ф}} = \left\{ k_{1\text{д}} (T_2^4 - T_{\text{д}}^4) + k_{1\text{ц}} (T_2^4 - T_{\text{ц}}^4) + k_{1\text{к}} (T_2^4 - T_{\text{к}}^4) \right\} \sigma, \quad (3)$$

где T_2 – температура наружного облицовочного слоя ЭВТИ, К;

$T_{\text{д}}$, $T_{\text{ц}}$, $T_{\text{к}}$ – измеряемые значения температуры внутренней поверхности элементов конструкции ТВК (в том числе днища, цилиндра и крышки), К;

$k_{1\text{д}}$ – взаимная поверхность переизлучения между фронтальной поверхностью объекта испытаний и днищем ТВК, м²;

$k_{1\text{ц}}$ – взаимная поверхность переизлучения между фронтальной поверхностью объекта испытаний и цилиндром ТВК, м²;

$k_{1к}$ – взаимная поверхность переизлучения между фронтальной поверхностью объекта испытаний и крышкой ТБК, м².

Взаимная поверхность переизлучения между фронтальной поверхностью объекта испытаний и дном ТБК определяется по формуле:

$$k_{1д} = \frac{\varphi_{1_д} F}{1 + \varphi_{1_д} (1/\varepsilon_2 - 1) + \varphi_{д_1} (1/\varepsilon_д - 1)}. \quad (3.1)$$

Взаимная поверхность переизлучения между фронтальной поверхностью объекта испытаний и цилиндром ТБК определяется по формуле:

$$k_{1ц} = \frac{\varphi_{1_ц} F}{1 + \varphi_{1_ц} (1/\varepsilon_2 - 1) + \varphi_{ц_1} (1/\varepsilon_ц - 1)}. \quad (3.2)$$

Взаимная поверхность переизлучения между фронтальной поверхностью объекта испытаний и крышкой ТБК определяется по формуле:

$$k_{1к} = \frac{\varphi_{1_к} F}{1 + \varphi_{1_к} (1/\varepsilon_2 - 1) + \varphi_{к_1} (1/\varepsilon_к - 1)}. \quad (3.3)$$

В формулах (3.1)–(3.3) используются следующие обозначения:

ε_2 – степень черноты наружного облицовочного слоя ЭВТИ;

$\varepsilon_д$, $\varepsilon_ц$, $\varepsilon_к$ – степени черноты внутренних поверхностей элементов конструкции ТБК (днища, цилиндра и крышки);

$\varphi_{1_д}$, $\varphi_{д_1}$, $\varphi_{1_ц}$, $\varphi_{ц_1}$, $\varphi_{1_к}$, $\varphi_{к_1}$ – предварительно рассчитываемые значения взаимных угловых коэффициентов облученности между объектом испытаний и соответствующими элементами конструкции внутренней поверхности ТБК (при заданных координатах расположения объектов испытаний в системе координат ТБК).

Тепловой поток, проходящий через фронтальную поверхность образца-свидетеля мата ЭВТИ

$$Q_F = (T_1 - T_2) \frac{F}{R_F}, \quad (4)$$

где R_F – искомое значение УТС образца-свидетеля мата ЭВТИ, м² К/Вт.

Тепловой поток, проходящий через окантовку образца мата ЭВТИ, условно принятую в виде концентрических поверхностей продольной половины цилиндра, длина которого равна периметру объекта испытаний,

$$Q_{\text{бок}} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\pi(T_1 - T_2) P_{\text{бок}}}{\frac{1}{\ln} \frac{\delta_{\text{п}} + 2\delta_{\text{э}}}{\delta_{\text{п}}}} \right\} = m_{\text{бок}} \frac{F}{R_F} (T_1 - T_2), \quad (5)$$

где $P_{\text{бок}}$ – периметр нагревательной пластины, м;

$\delta_{\text{э}}$ – толщина пакета ЭВТИ, м;

$\delta_{\text{п}}$ – толщина нагревательной пластины, м;

$m_{\text{бок}}$ – фиксированная доля тепловых потерь через окантовку образца-свидетеля мата ЭВТИ.

Фиксированная доля тепловых потерь через окантовку образца-свидетеля мата ЭВТИ определяется по формуле:

$$m_{\text{бок}} = \frac{\Pi_{\text{бок}} \pi \delta_{\text{э}}}{F \ln \frac{\delta_{\text{п}} + 2\delta_{\text{э}}}{\delta_{\text{п}}}}. \quad (5.1)$$

Мощность тепловых потерь по кабельной сети (с учетом принятого допущения)

$$Q_{\text{КАБ}} = 0. \quad (6)$$

Система уравнений (1)–(6) содержит шесть неизвестных параметров $R_{\text{Ф}}$, $Q_{\text{Ф}}$, T_1 , T_2 , $Q_{\text{БОК}}$, $Q_{\text{КАБ}}$ при назначенном составе контролируемых и измеряемых параметров ЭУ.

После исключения параметров $Q_{\text{БОК}}$, $Q_{\text{КАБ}}$ и выполнения преобразований, расчетное текущее значение удельного термического сопротивления образцов матов ЭВТИ определяется при последовательном выполнении ниже следующего алгоритма вычислений, реализуемого в ходе проведения испытаний средствами ИВУСТП.

Рассчитываются текущие осредненные значения температуры элементов конструкции ТБК по измеряемым параметрам датчиковой аппаратуры (см. рис. 1):

– температура днища ТБК:

$$T_{\text{д}} = \frac{\Delta T_{\text{д1}} + \Delta T_{\text{д2}}}{2}, \quad (7)$$

– температура цилиндра ТБК:

$$T_{\text{ц}} = \frac{\Delta T_{\text{ц1}} + \Delta T_{\text{ц2}}}{2}, \quad (8)$$

– температура крышки ТБК:

$$T_{\text{к}} = \frac{\Delta T_{\text{к1}} + \Delta T_{\text{к2}} + \Delta T_{\text{к3}} + \Delta T_{\text{к4}}}{4}, \quad (9)$$

– температура фона ТБК (одинаковая для обоих образцов-свидетелей):

$$T_{\text{Ф}} = \sqrt[4]{\frac{k_{1\text{д}} T_{\text{д}}^4 + k_{1\text{ц}} T_{\text{ц}}^4 + k_{1\text{к}} T_{\text{к}}^4}{k_{1\text{д}} + k_{1\text{ц}} + k_{1\text{к}}}}. \quad (10)$$

Рассчитываются текущие осредненные значения температуры для каждой нагревательной пластины по измеренным параметрам датчиковой аппаратуры (см. рис. 2):

– температура нагревательной пластины “эталонного” образца-свидетеля:

$$T_{\text{П0}} = \frac{\Delta T_{\text{П10}} + \Delta T_{\text{П20}} + \Delta T_{\text{П30}}}{3}, \quad (11)$$

– температура нагревательной пластины “исследуемого” образца-свидетеля:

$$T_{\text{П}} = \frac{\Delta T_{\text{П1}} + \Delta T_{\text{П2}} + \Delta T_{\text{П3}}}{3}. \quad (12)$$

Рассчитывается текущее значение температуры на наружной поверхности “эталонного” образца-свидетеля по измеренным параметрам “ $T_{\text{Ф}}$ ” и “ $N_{\text{ЭН0}}$ ”:

$$T_{20} = \sqrt[4]{T_{\text{Ф}}^4 + \frac{N_{\text{ЭН0}}}{(k_{1\text{д}} + k_{1\text{ц}} + k_{1\text{к}}) \sigma (2 + m_{\text{бок0}})}}. \quad (13)$$

Рассчитывается текущее значение температуры на наружной поверхности “исследуемого” образца-свидетеля по измеренным параметрам “ T_{Φ} ” и “ $N_{ЭН}$ ”:

$$T_2 = \sqrt[4]{T_{\Phi}^4 + \frac{N_{ЭН}}{(k_{лд} + k_{лц} + k_{лк})\sigma(2 + m_{бок})}}. \quad (14)$$

Рассчитываются текущие значения температуры на внутренней поверхности “эталонного” образца-свидетеля по измеренным параметрам “ $T_{П0}$ ” и “ $N_{ЭН0}$ ”:

– для оптимистической оценки,

$$T_{10\max} = T_{П0}, \quad (15)$$

– для пессимистической оценки (при положительном значении подкоренного выражения):

$$T_{10\min} = \sqrt[4]{T_{П0}^4 - \frac{N_{ЭН0}}{\epsilon_{П-10}\sigma F(2 + m_{бок0})}}. \quad (16)$$

Рассчитываются текущие значения температуры на внутренней поверхности “исследуемого” образца-свидетеля по измеренным параметрам “ $T_{П}$ ” и “ $N_{ЭН}$ ”:

– для оптимистической оценки:

$$T_{1\max} = T_{П}, \quad (17)$$

– для пессимистической оценки (при положительном значении подкоренного выражения):

$$T_{1\min} = \sqrt[4]{T_{П}^4 - \frac{N_{ЭН}}{\epsilon_{П-1}\sigma F(2 + m_{бок})}}. \quad (18)$$

Рассчитываются текущие значения удельного термического сопротивления “эталонного” образца-свидетеля:

– для оптимистической оценки (при $N_{ЭН0} > 0$):

$$R_{\max0} = \frac{(T_{П0} - T_{20}) F(2 + m_{бок0})}{N_{ЭН0}}, \quad (19)$$

– для пессимистической оценки (при $N_{ЭН0} > 0$ и $T_{10\min} > T_{20}$):

$$R_{\min0} = \frac{(T_{10\min} - T_{20}) F(2 + m_{бок0})}{N_{ЭН0}}. \quad (20)$$

Рассчитываются текущие значения удельного термического сопротивления “исследуемого” образца-свидетеля:

– для оптимистической оценки (при $N_{ЭН} > 0$):

$$R_{\max} = \frac{(T_{П} - T_2) F(2 + m_{бок})}{N_{ЭН}}, \quad (21)$$

– для пессимистической оценки (при $N_{ЭН} > 0$ и $T_{1\min} > T_2$),

$$R_{\min} = \frac{(T_{1\min} - T_2) F(2 + m_{бок})}{N_{ЭН}}. \quad (22)$$

В качестве зачетных результатов принимаются значения соответствующие достижению стационарного состояния объектов испытаний по измеренным значениям температуры нагревательных пластин при градиенте не более 1 К/ч и, в конечном итоге, по достижению стационарного состояния для рассчитываемых значений удельного термического сопротивления при градиенте не более 0.05 м² К/(Вт ч).

Перечень измеряемых и рассчитываемых параметров методики представлен в табл. 1.

Таблица 1. Перечень измеряемых и рассчитываемых параметров методики

№ № п/п	Обозначение параметра	Единица измерения	Диапазон измерений	Допустимая погрешность	Номер формулы	Примечание						
1	$R_{твк}$	мм рт. ст.	$760 - 1 \times 10^{-5}$	–	–	Система вакуумирования ТБК						
2	$DT_{вх}$	°C (К)	от –190 до + 30	$\pm 1.00\%$	Измеренное	Температурные параметры элементов конструкции ТБК						
3	$DT_{вых}$											
4	$DT_{д1}$											
5	$DT_{д2}$											
6	$T_{д}$						–	–	7			
7	$DT_{ц1}$						от –190 до + 30	$\pm 1.00\%$	Измеренное			
8	$DT_{ц2}$											
9	$T_{ц}$									–	–	8
10	$DT_{к1}$											
11	$DT_{к2}$											
12	$DT_{к3}$											
13	$DT_{к4}$											
14	$T_{к}$									–	–	9
15	$T_{ф}$									–	–	10
16	$DT_{п10}$	°C (К)	от –190 до + 70	$\pm 1.00\%$	Измеренное	Параметры “Эталонного” образца-свидетеля № 1						
17	$DT_{п20}$											
18	$DT_{п30}$											
19	$T_{п0}$									–	–	11
20	T_{10max}									–	–	15
21	T_{10min}						–	–	16			
22	T_{20}						–	–	13			
23	$N_{ЭН0}$	Вт	от 0 до 5	Градуировка	$N_{ЭН0} = U_0^2 / R_{ЭН0}$							
24	R_{max0}	$m^2 K/Вт$	от 0 до 50	–	19							
25	R_{min0}				20							
26	$DT_{п1}$	°C (К)	от –190 до + 70	$\pm 1.00\%$	Измеренное	Параметры “Исследуемого” образца-свидетеля № 2						
27	$DT_{п2}$											
28	$DT_{п3}$											
29	$T_{п}$						–	–	12			
30	T_{1max}						–	–	17			
31	T_{1min}						–	–	18			
32	T_2						–	–	14			
33	$N_{ЭН}$	Вт	от 0 до 5	Градуировка	$N_{ЭН} = U^2 / R_{ЭН}$							
34	R_{max}	$m^2 K/Вт$	от 0 до 50	–	21							
35	R_{min}				22							

Примечание. В расчетных формулах используются значения температуры, выраженные в “К”. Вывод информации на форматы отображения результатов осуществляется с представлением температуры в “°C”.

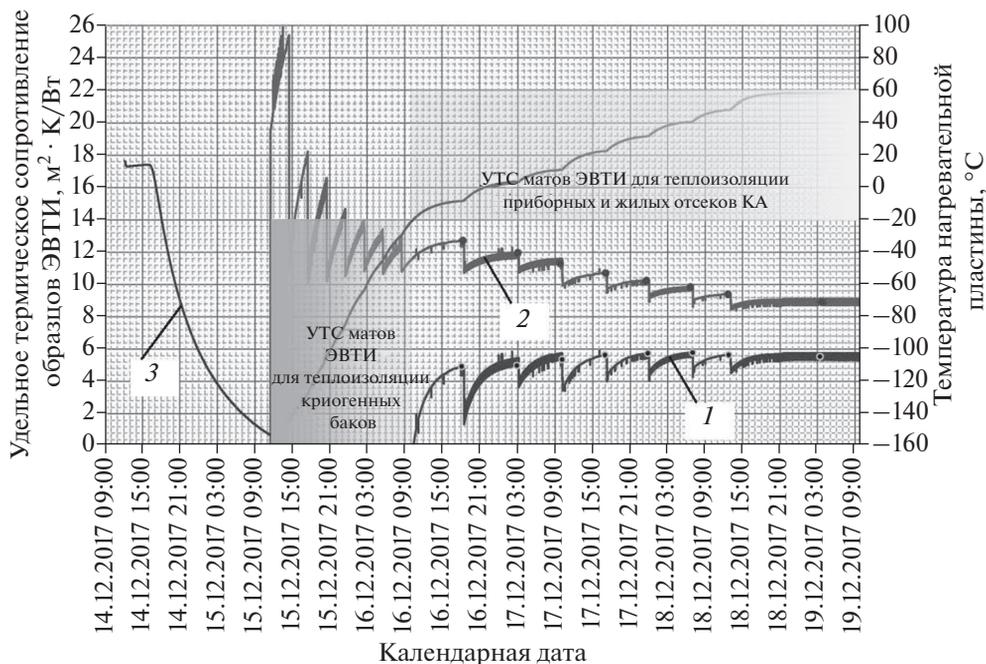


Рис. 3. Оптимистическая и пессимистическая оценки результатов испытаний по определению удельного термического сопротивления образца № 1 с ЭВТИ-2В-10 (табл. 1 – первая загрузка в ТВК)

1 – $R_{\min 0}$; 2 – $R_{\max 0}$; 3 – $T_{\text{П}0}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КАЧЕСТВА МАТОВ ЭВТИ

Состав матов ЭВТИ и оптические характеристики облицовочных материалов подбираются с учетом влияния конкретных факторов космического пространства при орбитальной эксплуатации КА. При этом теплоизоляционные характеристики матов ЭВТИ, при прочих равных условиях, существенно зависят от уровня температуры теплоизолируемой поверхности, так, например, в случае применения ЭВТИ для теплоизоляции баков с криогенными жидкостями значение УТС в несколько раз эффективнее по сравнению с теплоизоляцией поверхностей приборных и жилых отсеков КА.

Ниже иллюстрируются полученные результаты верификации образцов-свидетелей матов ЭВТИ, предназначенных для эксплуатации на околоземной орбите в составе КА с допустимым диапазоном температуры термостатируемых поверхностей от минус 20 до плюс 60 $^{\circ}\text{C}$. Испытаниям по оценке удельного термического сопротивления подвергались три образца-свидетеля матов ЭВТИ с одинаковым составом облицовочных материалов, но отличающихся составом применяемых экранных материалов при одинаковом количестве слоев, в том числе следующие типы марок:

- “эталонный” образец № 1 типа ЭВТИ-2В-10;
- “исследуемый” образец № 2 типа ЭВТИ-ЭБК-10;
- “исследуемый” образец № 3 типа ЭВТИ-2Б-10.

На рис. 3–6 представлены результаты испытаний по определению оптимистических и пессимистических оценок удельного термического сопротивления образцов-свидетелей матов ЭВТИ для типовых граничных условий эксплуатации орбитального

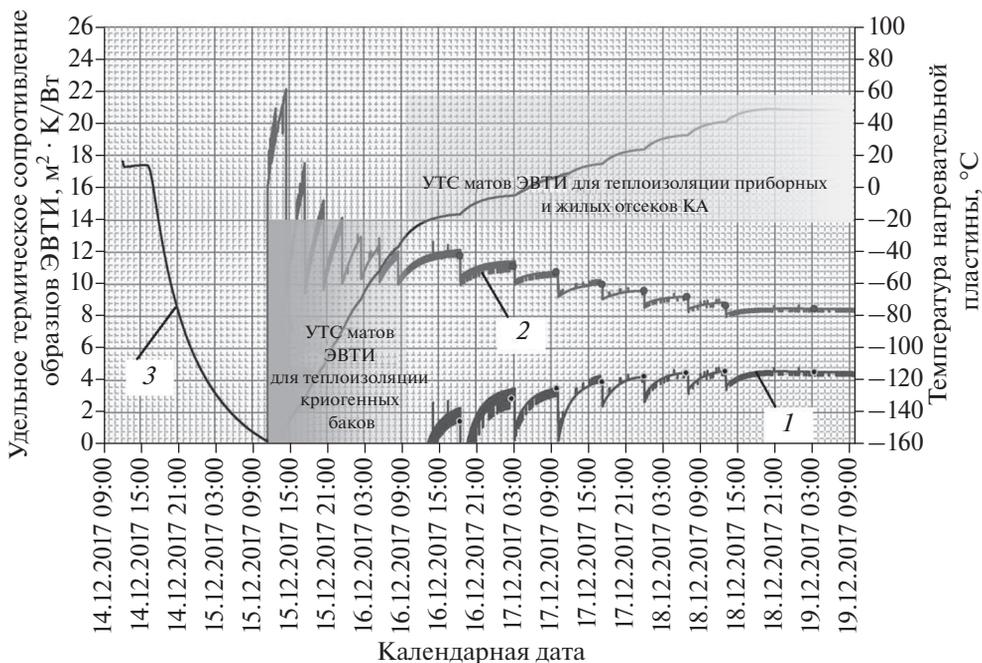


Рис. 4. Оптимистическая и пессимистическая оценки результатов испытаний по определению удельного термического сопротивления образца №2 с ЭВТИ-ЭБК-10 (табл. 1 – первая загрузка в ТВК)

1 – R_{\min} ; 2 – R_{\max} ; 3 – $T_{\text{П}}$.

полета КА. При этом более подробно исследовался температурный диапазон для применения матов ЭВТИ в качестве теплоизоляции приборных и жилых отсеков КА. Для этого диапазона, в качестве критерия достижения стационарного режима в процессе испытаний, использовалось значение градиента рассчитываемого значения удельного термического сопротивления не более $0.1 \text{ м}^2 \text{ К}/(\text{Вт ч})$, но с продолжительностью режима не более восьми часов.

На рис. 6 представлены обобщенные результаты сравнения теплоизоляционных характеристик испытываемых образцов-свидетелей матов ЭВТИ в виде зависимости удельного термического сопротивления от температуры нагревательных пластин (от температуры теплоизолируемой поверхности КА). На рис. 6, по результатам испытаний, отмечена область существования гарантированных значений УТС. Установлено, что “эталонный” образец-свидетель мата ЭВТИ № 1 обладает более эффективными теплоизоляционными свойствами и его применение на КА является предпочтительным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана и экспериментально апробирована программа и методика инженерной оценки удельного термического сопротивления образцов-свидетелей матов ЭВТИ для типовых граничных условий эксплуатации. Методика позволяет производить качественную и количественную оценку удельного термического сопротивления вновь разрабатываемых конструкций матов ЭВТИ с гарантированным запасом, что обеспечивает повышение надежности проектирования СОТР.

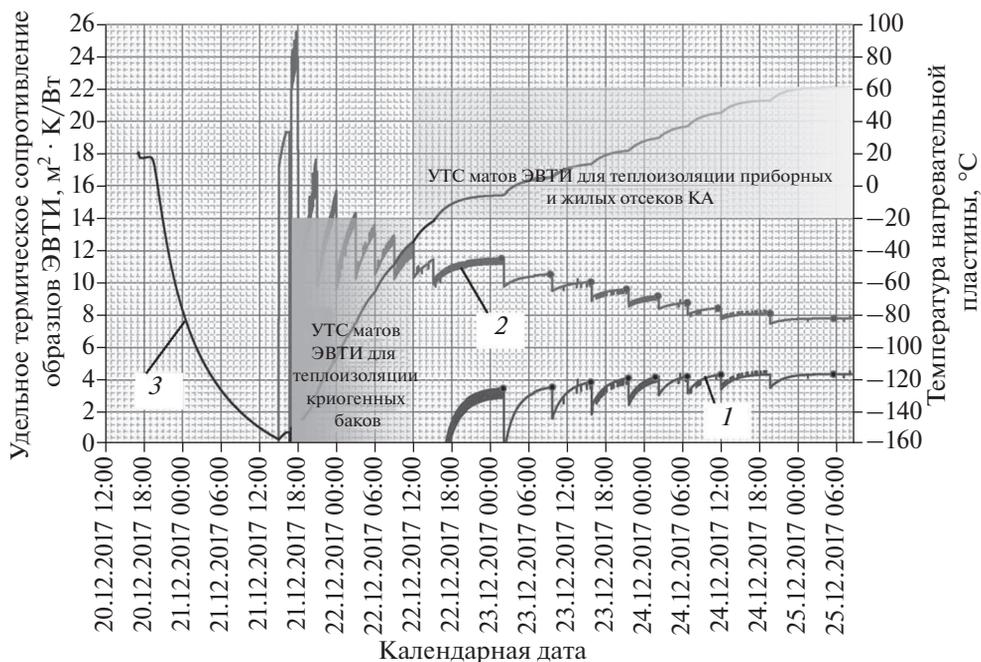


Рис. 5. Оптимистическая и пессимистическая оценки результатов испытаний по определению удельного термического сопротивления образца № 3 с ЭВТИ-2Б-10 (табл. 2 – вторая загрузка в ТВК)

1 – R_{\min} ; 2 – R_{\max} ; 3 – $T_{\text{П}}$.

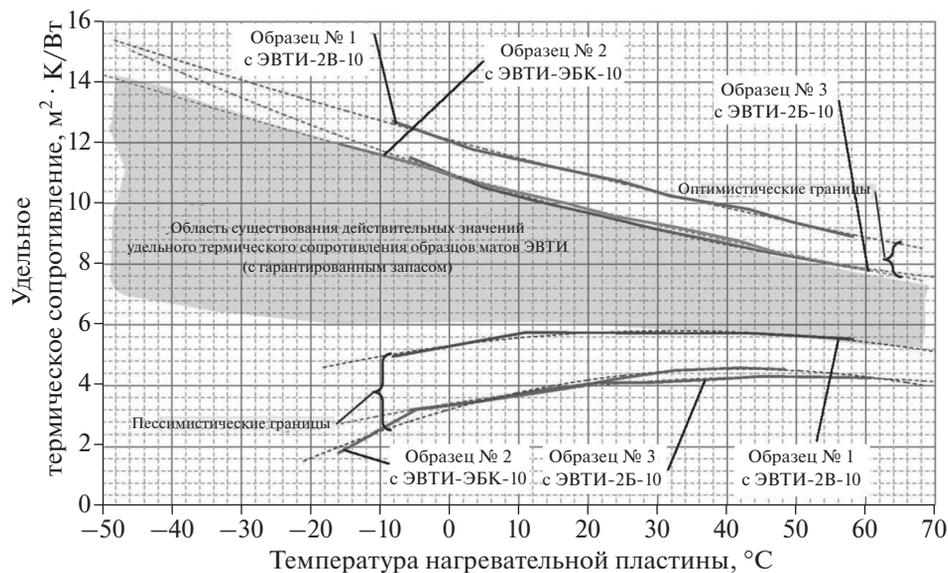


Рис. 6. Зависимость удельного термического сопротивления образцов ЭВТИ от осредненной температуры облицовочных поверхностей.

2. Разработана ЭУ для верификации матов ЭВТИ с применением оборудования из состава экспериментальной базы РКК “Энергия”.

3. Проведены испытания по определению удельного термического сопротивления различных образцов матов ЭВТИ в целях выявления наиболее эффективных марок для применения на перспективных КА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басов А.А., Огорокова К.С., Ставрицкий А.К. Системы обеспечения теплового режима разгонных блоков типа ДМ ракет космического назначения // Космическая техника и технологии. 2016. № 3. С. 71–79.
2. ОСТ 92-1380-83 – Отраслевой стандарт “Изоляция тепловая экранно-вакуумная. Марки и технические требования”.
3. ОСТ 92-1381-83 – Отраслевой стандарт “Изоляция тепловая экранно-вакуумная. Типовые технологические процессы”.
4. Колесников А.В., Палешкин А.В., Сыздыков Ш.О. // Тепловые процессы в технике. 2017. Т. 9. № 1. С. 34–39. “Наука и техника”.
5. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981.

Methodology for Assessing the Specific Thermal Resistance of Multilayer Isulation Mats Samples

V. A. Baranchikov^{a, #}, A. A. Basov^a, and M. A. Klochkova^a

^a*Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Russia*

[#]*e-mail: post@rsce.ru*

In current paper deals with verification of thermal insulation properties of MLI, used as passive means in thermal regulation system of spacecraft. The variety of various constructive, technological and operational factors that have a cumulative effect of the thermal insulation properties of MLI mats was considered. The methodological principles of autonomous tests for assessing and comparing the thermal insulation quality of MLI mats samples were set forth. The technical requirements for experimental facility, complete with equipment available on RSC “Energia” experimental base, were determined. Method of determination of valid values guaranteed range of specific thermal resistance of MLI mats samples was verified under tests on special experimental facility. The necessary of applying this test method to study new promising dust-free materials in MLI mats was justified.

Keywords: multilayer insulation (MLI), emissivity factor, solar absorptance, thermal conductivity, specific thermal resistance