

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И КАЛИБРОВКА ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА-ТЕПЛОМЕРА С ЦЕЛЬЮ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОГО ИНТЕРФЕЙСА В ТЕПЛОВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

А.Ю. Кочетков, Е.Ю. Котляров, А.Ф. Шабарчин, Е.В. Шеметова

АННОТАЦИЯ

Исследуются характеристики изготовленного опытного образца теплообменника-тепломера, концепция и конструкция которого были предложены авторами на предшествующем этапе работы, который освещался ранее и посвящен расчетно-экспериментальным оценкам характеристик имитатора теплового интерфейса, с помощью которого предполагается «воспроизводить» соединение тепловыделяющего оборудования и теплоотводящего тракта космического аппарата (КА) в тепловакуумных испытаниях при температуре около минус 100°С. Фактически, изготовленный теплообменник-тепломер должен обеспечивать поддержание заданной в технических требованиях температуры контактной поверхности теплового интерфейса и, одновременно, осуществлять контрольное измерение регламентированной величины теплового потока от полезной нагрузки к интерфейсу. При разработке теплообменника-тепломера и определении методики его применения первостепенной была сформулирована задача достижения стабилизации требуемой температуры имитатора интерфейса в процессе испытаний. Не менее важной, но сопутствующей была обозначена задача обеспечить возможность количественной оценки стационарного теплового потока, проходящего через интерфейс. Последнее достигается в результате совмещения мощностей полезной нагрузки (тепловыделяющего оборудования) и электронагревателя тепломера, с одновременным подбором мощности второго, целенаправленно, до достижения требуемой температуры на контактной поверхности интерфейса. Так двойное требование к интерфейсу (к потоку и к температуре) обеспечиваются одновременно. При адаптации теплообменника-тепломера к выполнению конкретных режимов испытаний, в его конструкции изменяют количество болтов, соединяющих теплообменник с контактной пластиной интерфейса. Это позволяет заданным образом подстраивать термическое сопротивление тепломера. Авторы представляют результаты, выполненных на этапе калибровки тепломера экспериментальных работ, которые подтверждают успешное решение поставленных задач.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ, ТЕПЛОВАКУУМНЫЕ ИСПЫТАНИЯ, ТЕПЛОВЫЕ НАГРУЗКИ, ТЕПЛООБМЕННИК-ТЕПЛОМЕР

EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND CALIBRATION OF THE CHARACTERISTICS OF THE LOW-TEMPERATURE HEAT METER IN ORDER TO CONTROL THE PARAMETERS OF THE THERMAL INTERFACE IN HEAT AND VACUUM TESTS

A.Y. Kochetkov, E.Y. Kotlyarov, A.F. Shabarchin, E.V. Shemetova

ABSTRACT

The characteristics of the manufactured prototype heat exchanger-heat meter. The concept and design of which were proposed by the authors at the previous stage of the work. Which was covered earlier and is

devoted to computational and experimental assessments of the characteristics of the thermal interface simulator. With the help of which it is supposed to “reproduce” the connection of the fuel equipment and the heat removal path of the spacecraft (SC) in heat and vacuum tests at a temperature of about minus 100 ° C. In fact, the heat exchanger manufactured must maintain the temperature of the contact surface of the thermal interface specified in the technical requirements and, at the same time. Carry out a control measurement of the regulated value of the heat flow from the payload to the interface. When developing the heat exchanger-heat meter and determining the procedure for its use, the primary task was formulated to achieve stabilization of the required temperature of the interface simulator during the tests. No less important, but concomitant, was the task of providing the ability to quantify the stationary heat flux passing through the interface. The letter is achieved as a result of combining the power of the payload (fuel equipment) and the electric heater of the heat meter, with simultaneous selection of the power of the second, purposefully, until the required temperature is reached on the contact surface of the interface. Thus, a double requirement for the interface 9 to flow and to temperature is provided simultaneously. When the heat exchanger-heat meter to specific test modes, to the interface contact plate is changed in its design. The allows the thermal resistance of the heat to be adjusted in a predetermined manner. The authors present the results of the experimental works performed at the stage of calibration of the heat meter, which confirm the successful solution of the set tasks.

KEYWORDS

SPACECRAFT, THERMAL VACUUM TESTS, THERMAL LOADS, HEAT EXCHANGED-HEAT METER

ВВЕДЕНИЕ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе [1] обсуждались некоторые особенности и сложности проведения тепловакуумных испытаний (ТВИ) маломощного низкотемпературного оборудования (МНО) космического назначения, в частности, было отмечено, что существуют технические сложности, которые препятствуют выполнению качественных стационарных тепловых режимов, обеспечивающих адекватные оценки тепловых параметров МНО. Для повышения эффективности и достоверности таких ТВИ авторы [1] предложили концепцию теплообменника-тепломера (Т/О-Т/М), а также специальную методику его применения и с помощью расчетно-экспериментального исследования обосновали эффективность предложенных мер.

Перед представлением очередной части работ, связанной с автономными испытаниями теплообменника-тепломера (в целях его подготовки к дальнейшему применению, в качестве имитатора теплового интерфейса в ТВИ), необходимо напомнить, что в процессе работ по созданию систем терморегулирования КА применяют, так называемые «пофрагментные тепловакуумные испытания» [2]. Такой подход необходим для эффективного проектирования систем обеспечения теплового режима (СОТР) КА, а также для диагностики теплотехнических характеристик СОТР. При этом, в практике создания СОТР широко применяется понятие «тепловой интерфейс» с целью формального описания тепловых граничных условий в зоне стыка (взаимодействия) составных частей или subsystem космического аппарата КА при их тепловом проектировании [3, 4].

В нашем случае, интерфейс (механический и тепловой) со стороны МНО представляет собой плоскую контактную поверхность, имеющую габариты 140x85 мм, к которой с помощью тепловых труб [5] от сборки МНО (фактически, это - полезная нагрузка) поступает тепловой поток не более 15 Вт. В разных конфигурациях штатного применения

рассматриваемой полезной нагрузки (ПН) тепловой поток может принимать, также, меньшие значения, например, 5 Вт. Причем, во всех случаях регламентируемый тепловой поток «привязывается» к температуре контактной поверхности интерфейса, которая составляет минус 110°С.

Рисунок 1 демонстрирует объект исследований - теплообменник-тепломер. Он же является имитатором теплового интерфейса. Из представленного изображения следует, что контактная пластина с установленным на нее нагревателем с помощью нескольких болтов крепится к теплообменнику. Основной температурный напор между контактной пластиной и теплообменником создается с помощью болтов, количество которых подбирают таким, чтобы можно было однозначно связать заданную температуру контактной пластины с «востребованным» (ожидаемым от ПН) значением теплового потока. В нашем случае поток для удержания температуры пластины при -110°С должен отвечать условию $Q \geq 15 \text{ Вт}$ (либо, для нескольких частных вариантов применения ПН, допустимо условие

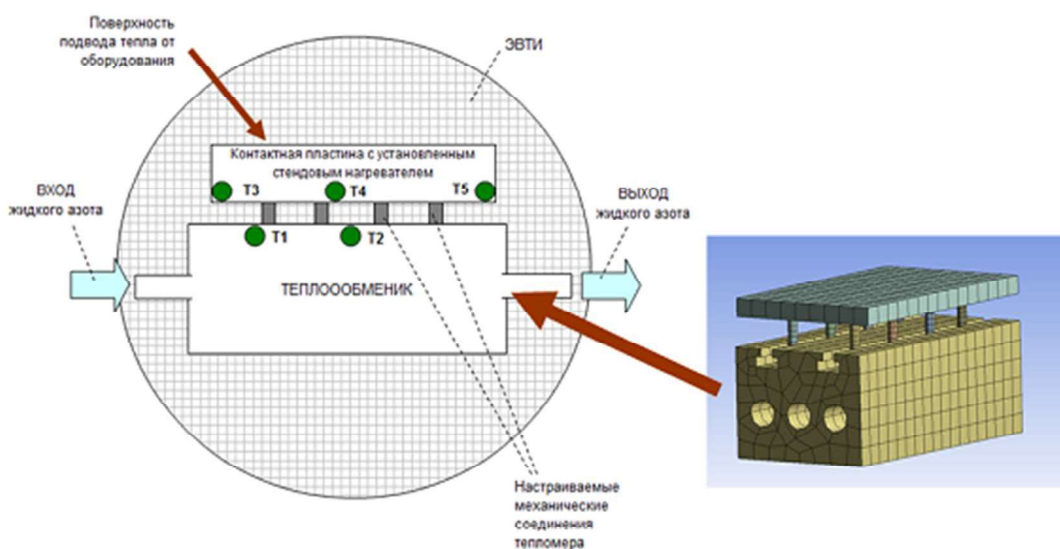


Рис. 1. Схема объект испытаний: теплообменника-тепломера

Стабилизация температуры самого теплообменника достигается за счет стабилизации температуры охлаждающего теплоносителя и установки высоких значений его расхода. Т.е. теоретически, при проведении ТВИ ПН, теплообменник-тепломер должен обеспечивать граничные условия 1-го рода как для контактной пластины, так и для теплообменника. Для проведения автономных испытаний Т/О-Т/М закрывается экранно-вакуумной теплоизоляцией (ЭВТИ), чтобы исключить влияние стендовых теплопритоков. Задача автономных ТВИ Т/О-Т/М - снять характеристики тепломера, а также откорректировать их при необходимости, меняя количество болтов (механических соединений тепломера, см. Рис.1). На контактной пластине установлены три температурных датчика T3, T4 и T5, на корпусе теплообменника со стороны, обращенной к пластине установлены два датчика: T1 и T2.

УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ, РЕЖИМЫ ИСПЫТАНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Исследование влияния рабочего уровня температуры теплообменника и градиентов температуры сборки Т/О-Т/М на контактные термические сопротивления (которые

доминируют преимущественно, в резьбовых соединениях между пластиной и теплообменником), проводилось на двух уровнях температуры: «низком» (при охлаждении жидким азотом) и «нормальном» (при охлаждении сжатым воздухом). Во втором случае воздух имеющий температуру около 17°C подавался на вход теплообменника под давлением 1.2 кгс/см². Для проведения низкотемпературных испытаний подача жидкого азота обеспечивалась созданием давления на входе в теплообменник величиной 0.8 кгс/см², чего оказалось достаточно для поддержания двухфазного стабилизированного теплообмена внутри теплообменника. Таким образом, при выполнении различных режимов испытаний Т/О-Т/М обеспечивалась стабилизация температуры конструкции теплообменника на двух уровнях: $\approx +17^\circ\text{C}$ и $\approx -180^\circ\text{C}$. В процессе выполнения ТВИ Т/О-Т/М давление в вакуумной камере поддерживалось на уровне не превышающем 1×10^{-4} мм рт.ст.

С помощью электронагревателя установленного на контактной пластине к объекту испытаний (сборке Т/О-Т/М) поочередно подводились нагрузки 10 Вт, 15 Вт и 20 Вт, при этом, за счет выдерживания неизменными всех параметров влияющих на режим испытаний, обеспечивалась необходимая стабилизация температуры. При охлаждении воздухом режимы выдерживались около 2 час, при охлаждении азотом – около 3 час.

Ход эксперимента и результаты температурных измерений иллюстрируют рисунки 2 и 3. Рисунок 2 демонстрирует температуры Т1-Т5, полученные при охлаждении внутренних каналов теплообменника воздухом. Рисунок 3 – при их охлаждении жидким азотом. В целом, к достигнутому качеству температурной стабилизации на контактной пластине Т/О-Т/М критических замечаний не выявлено.

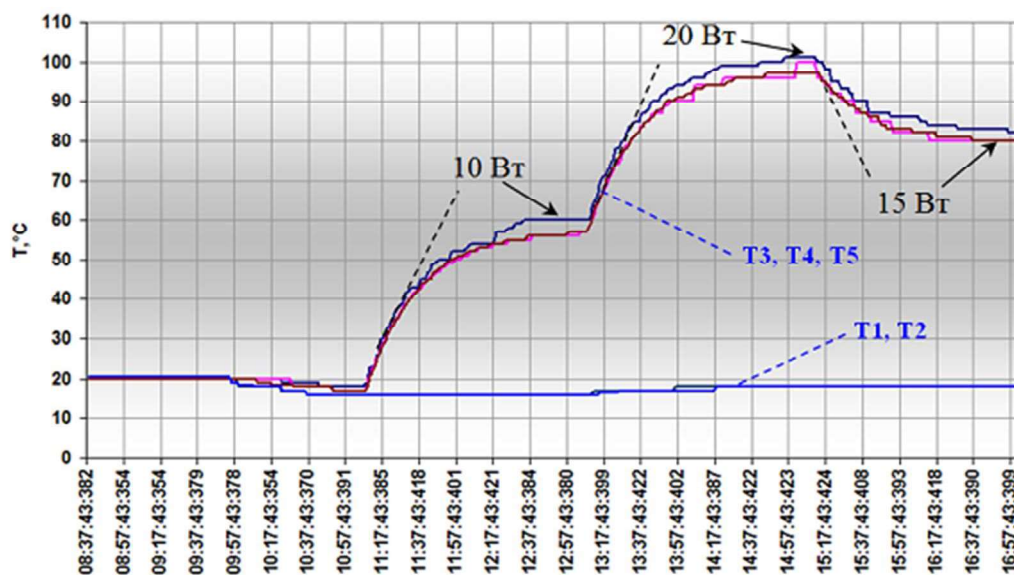


Рис. 2. Циклограммы температуры, полученные в ТВИ теплообменника-тепломера при охлаждении устройства сжатым воздухом.

Регистрируемые температурными датчиками градиенты температуры в пределах пластины и в пределах корпуса теплообменника при общем рассмотрении можно классифицировать как малозначимые в сравнении с перепадом температуры по тепломеру.

В результате проведения низкотемпературного эксперимента (см. Рис.3) было выявлено, что тепловой поток к контактной пластине при температуре на ней минус 110°C будет

слишком низким. Для исправления этого, концепция применения Т/О-Т/М предусматривает целенаправленное увеличение термического сопротивления тепломера. Было решено увеличить количество болтовых соединений (пластины с теплообменником), доведя его до 13 шт. от изначально установленных 9 шт. Достигнутые результаты демонстрируют рисунки 4 и 5.

Ожидаемо, что температура пластины стала ниже (при тех же тепловых нагрузках 10/15/20 Вт) как при охлаждении азотом, так и при охлаждении воздухом. Теперь, в низкотемпературных испытаниях, температуре минус 110°C соответствует тепловой поток около 12 Вт. Его можно получить из линейной аппроксимации по зафиксированным в испытаниях парам значений: -119°C/10Вт и -95°C/15Вт, см рис.5.

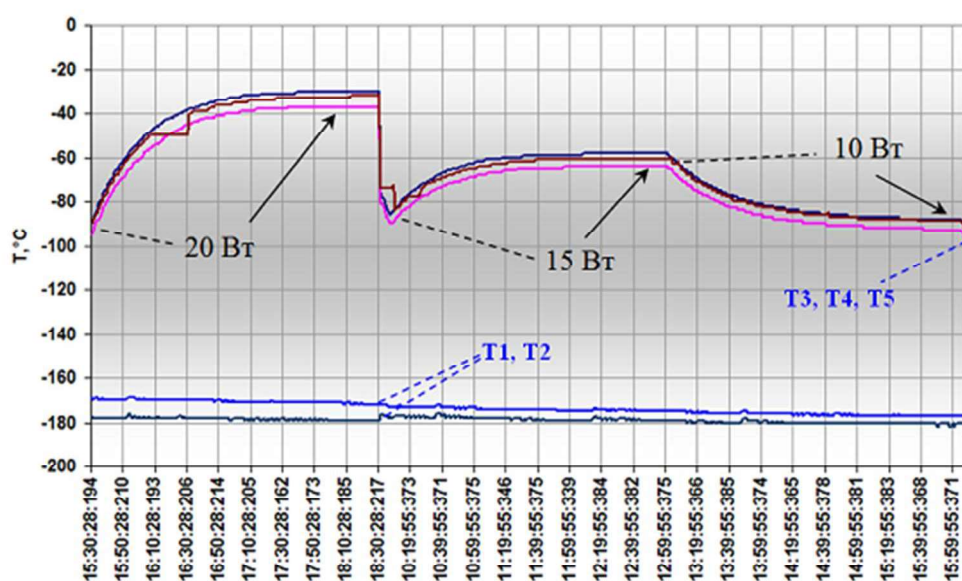


Рис. 3. Циклограммы температуры, полученные в ТВИ теплообменника-тепломера при охлаждении устройства жидким азотом

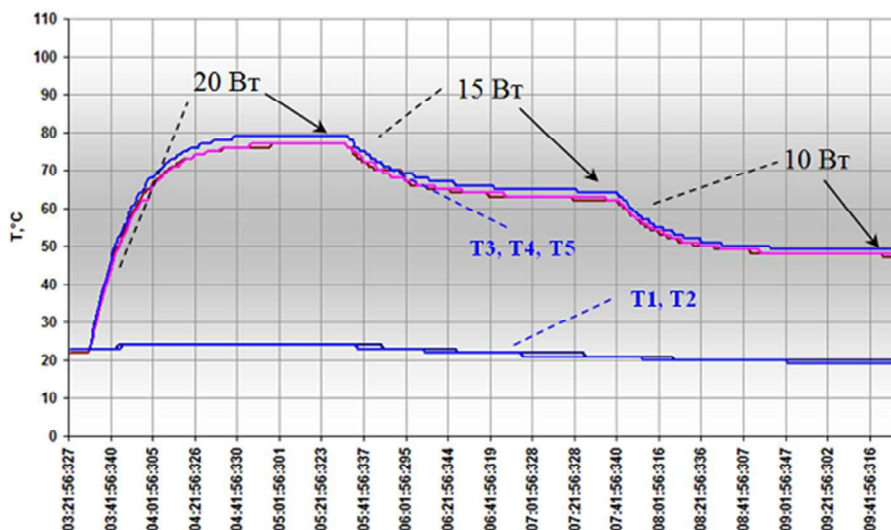


Рис. 4. Циклограммы температуры, полученные при охлаждении воздухом после корректировки термического сопротивления тепломера

В дальнейшем, при проведении ТВИ ПН, т.е. после подсоединения ПН к контактной пластине имитатора интерфейса (Т/О-Т/М), тепловой поток от ПН можно будет определить как

$$Q_{\text{ПН}} = 12 - W_{\text{Н}},$$

где $W_{\text{Н}}$ – мощность электронагревателя контактной пластины имитатора интерфейса, Вт, подобранная при ТВИ ПН (! не ТВИ Т/О-Т/М) для достижения температуры пластины минус 110°C. Такой метод измерений («метод одной точки») не требует детального исследования термического сопротивления тепломера в широком диапазоне температур и потоков. Однако, требуется чтобы в одной точке («зачетной») характеристика Т/О-Т/М стабильно удерживалась и воспроизводилась, а действия и процедуры мешающие этому не допускались, как минимум между этапами калибровки тепломера и проведением ТВИ ПН. Теоретически, на этапе калибровки тепломера величина «12 Вт» может быть определена точно, а не с помощью аппроксимации, но практический опыт показывает, что увеличение количества режимов в исследуемом интервале может отразиться на «качестве» выполнения отдельных стационарных режимов и, в этом случае, дополнительные точки на графике не будут гарантировать повышения достоверности результатов.

Всего при калибровке тепломера было выполнено 12 режимов испытаний, отраженных в таблице 1.

Таблица 1
Перечень режимов испытаний Т/О-Т/М

Режим	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Q _н , Вт	110	115	220	110	115	220	110	115	220	110	115	220
T _{т/о} ≥ °C	+17	+17	+17	-180	-180	-180	+17	+17	+17	-180	-180	-180
Nbolts	9	9	9	9	9	9	13	13	13	13	13	13

Здесь, каждый режим однозначно идентифицируется «тройкой» параметров: мощность, температура, количество болтов.

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООБМЕННИКА-ТЕПЛОМЕРА И РЕКОМЕНДАЦИИ К ИХ ПРИМЕНЕНИЮ

Для анализа характеристик тепломера, полученных в автономных ТВИ Т/О-Т/М рассмотрим следующие зависимости (применительно к установившимся режимам):

- $Q=f(\Delta T)$ - поток через тепломер, как функция температурного перепада по тепломеру;
- $Q=f(R)$ - поток через тепломер, как функция термического сопротивления тепломера;
- $Q=f(T_{пл})$ - поток через тепломер, как функция температуры пластины;
- $R=f(\Delta T)$ - термическое сопротивление тепломера, как функция температурного перепада по тепломеру;
- $R=f(Q_{н})$ - термическое сопротивление тепломера, как функция мощности электронагревателя;
- $R=f(T_{пл})$ - термическое сопротивление тепломера, как функция температуры пластины.

Здесь, R выражает отношение перепада температуры по тепломеру к мощности электронагревателя ($\Delta T/Q$). ΔT - средняя температура пластины минус средняя температура теплообменника.

Сформулированные зависимости изображены графически на рисунках 6 и 7 как а), б), в), г), д), е), соответственно. Маркер на любом из графиков отражает один из стабилизированных режимов испытаний, перечисленных в Таблице 1.

Из полученных результатов следует, что термическое сопротивление тепломера способно возрасти почти в 2 раза при переходе из температурной зоны функционирования Т/О-Т/М [+17..+100°C] в зону [-180..-30°C]. В зоне только низкотемпературных испытаний, т.е. когда температура теплообменника стабилизируется с помощью кипящего азота, термическое сопротивление тепломера R также заметно зависит от температуры пластины. Однако, в узком диапазоне, т.е. при небольших отклонениях температуры пластины от регламентированного значения температуры интерфейса, данные зависимости (учитывая их монотонность) можно учитывать с помощью аппроксимаций. Например, с помощью полиномов «линий тренда» показанных на графиках Рис. 6 и 7.

С учетом сказанного, поток $Q_{пн}$, который необходимо определять при ТВИ ПН, можно оценивать, применяя зависимость $R=f(T_{пл})$ как

$$Q_{пн} = \frac{\Delta T}{R(T_{пл})} - W_{н} = \frac{T_{пл} - T_{то}}{A(T_{пл})^2 + B(T_{пл}) + C} - W_{н}$$

где $T_{пл}$ - температура пластины (в испытаниях ПН), $T_{то}$ - температура теплообменника, $\Delta T=(T_{пл}$ минус $T_{то})$, $W_{н}$ – мощность электронагревателя контактной пластины, «добавленная» (к потоку от ПН) для достижения температуры пластины \approx минус 110°C. $R(T_{пл})$ – интерполяционный полином (построенный по экспериментальным точкам автономных испытаний Т/О-Т/М). A , B , C - постоянные коэффициенты.

Если пренебречь тем, что отклонение температуры корпуса теплообменника (при переходе от испытаний Т/О-Т/М к испытаниям ПН) может несколько исказить ΔT тепломера, тогда можно аппроксимировать не R , а непосредственно $Q=f(T_{пл})$ (тепломера):

$$Q_{ПН} = Q(T_{пл}) - W_H = D(T_{пл})^2 + E(T_{пл}) + F - W_H.$$

Здесь D, E, F – постоянные коэффициенты, $T_{пл} \approx -110^\circ\text{C}$.

Подбирая R (т.е. меняя количество болтов) так, чтобы компенсирующая мощность электронагревателя W_H стремилась к 0 Вт (отрицательные значения не допускаются) можно добиваться повышения точности определения $Q_{ПН}$. Однако, неидеальное поддержание температуры пластины $T_{пл}$, например, в силу наличия градиентов по самой пластине, также влияет на (методическую) точность. Так отклонение $T_{пл}$ на 5К даст, для тепломера, откалиброванного на 15 Вт, отклонение потока $Q_{ПН} \approx 1$ Вт. Поэтому, если режим ТВИ ПН был выполнен, например, при $T_{пл} = \text{минус } 115^\circ\text{C}$, (а не -110°C) тогда можно рассмотреть два пути уточнения $Q_{ПН}$.

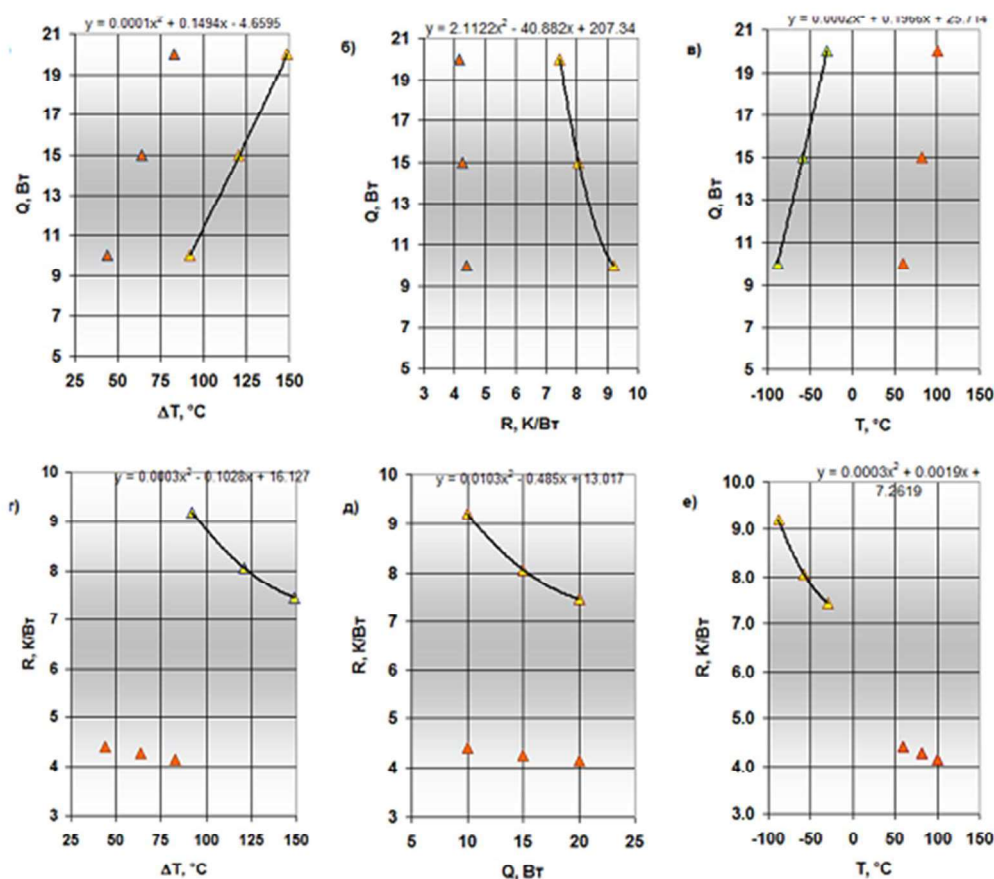


Рис. 6. Зависимость термического сопротивления тепломера и передаваемого потока от различных факторов: $T_{пл}$, Q_H , R , ΔT . (В тепломере 9 болтов)

В первом случае, делаем допущение, что незначительные отклонения $T_{пл}$ незначительно влияют на поток от ПН (или влияют в запас) и «пересчитываем» (пропорционально) результат на минус 110°C :

$$Q_{\text{ПН}(110)} = (D(-110)^2 + E(-110) + F) \cdot \left(1 - \frac{W_{\text{H}}}{D(T_{\text{ПЛ}})^2 + E(T_{\text{ПЛ}}) + F} \right)$$

Во втором случае учитываем то, что $Q_{\text{ПН}}$ растет при понижении $T_{\text{ПЛ}}$ (исходя из физических принципов работы МНО) и выполняем еще один режим, например, для минус 105°C . Далее, имея два значения W_{H} , вычисляем два значения $Q_{\text{ПН}}$ и аппроксимируем результат для минус 110°C :

$$Q_{\text{ПН}} = \frac{Q_{\text{ПН}}(T_{\text{ПЛ}2}) - Q_{\text{ПН}}(T_{\text{ПЛ}1})}{T_{\text{ПЛ}1} - T_{\text{ПЛ}2}} \cdot (110 + T_{\text{ПЛ}1}) + Q_{\text{ПН}}(T_{\text{ПЛ}1})$$

Второй способ позволяет учесть то, что с повышением уровня температуры стыка (интерфейса) поток через тепломер растет, а доля теплового потока от ПН в нем падает и, наоборот, с понижением температуры стыка абсолютное значение и доля $Q_{\text{ПН}}$ – растут, хотя поток через тепломер снижается.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Полученные в данной работе результаты дополнительно демонстрируют, что разработанный способ стабилизации температуры и регистрации теплового потока, фактически, ориентирован на одну рабочую точку. Калибровка тепломера должна выполняться применительно к данной точке (как правило, этой точкой является регламентированная температура контактной поверхности теплового интерфейса) с минимально возможными отклонениями. В случае, когда планируется подготовка работы имитатора интерфейса на другом уровне рабочей температуры (или для существенно отличающегося значения заданного теплового потока к интерфейсу) все предусмотренные методикой процедуры следует выполнить (повторить) индивидуально, «как для новой точки».

С учетом свойств тестируемого в ТВИ МНО (в котором собственное тепловыделение и теплопритоки соизмеримы), добиться повышения точности измерения $Q_{\text{ПН}}$ на контактной пластине можно выполнив два теста: для $T_{\text{ПЛ}} = -110 - \delta$ и $T_{\text{ПЛ}} = -110 + \delta$. В этом случае контроль требования к теплому интерфейсу для $T_{\text{ПЛ}} = -110$ будет более корректным. Отклонение температуры δ от $T_{\text{ПЛ}} = -110$ определяется возможностями испытательного оборудования и (из опыта проведения подобных ТВИ) может быть представлен величиной $\approx 2-5\text{K}$.

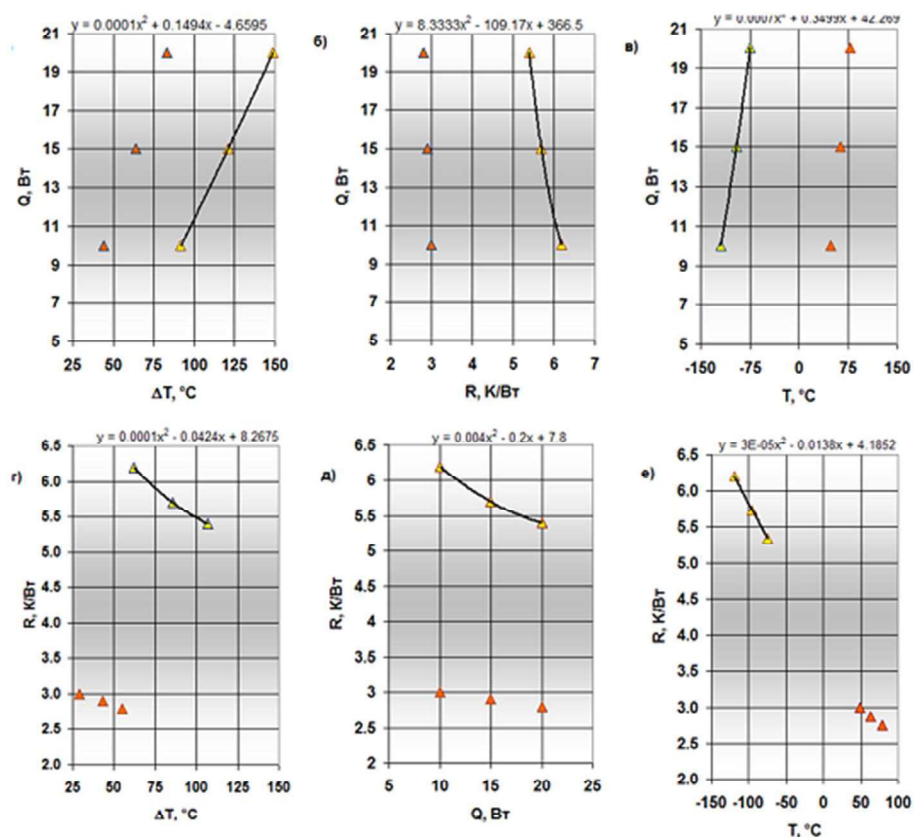


Рис. 7. Зависимость термического сопротивления тепломера и передаваемого потока от различных факторов: Tпл, Qн, R, ΔT. (В тепломере 13 болтов).

Технология сборки и установки теплообменника-тепломера в вакуумную камеру, а затем «доустановка» туда же тестируемого оборудования (т.е. ПН) должна быть организована так, чтобы настройки тепломера не были нарушены. Т.е. любая частичная сборка или разборка имитатора интерфейса (или сопряженных элементов, которые могут оказать влияние) потребуют новой калибровки тепломера. В некоторых случаях факторы, которые способны оказать влияние на механические соединения контактной пластины и теплообменника могут оказаться не столь очевидными, поэтому калибровку теплообменника-тепломера, а затем, проведение ТВИ ПН с его помощью целесообразно проводить последовательно и одновременно, т.е. без перерывов и промежуточных работ. В случае выявления отклонений в сценарии проведения режимов ТВИ, либо в полученных результатах, повторная автономная проверка характеристик тепломера, непосредственно после ТВИ ПН, также вполне обоснована.

Чувствительность тепловых контактных сопротивлений T/O-T/M в вакууме к температурному уровню и градиентам температуры убедительно компенсируется применением «метода одной точки», однако, разработка альтернативных вариантов настраиваемой тепловой связи теплообменника с интерфейсной пластиной может представлять интерес с целью расширения возможностей применения предлагаемой концепции T/O-T/M. Рисунок 8 показывает, что функцию болтов могут выполнить тонкие теплопроводящие паяные проводочки.

Если подобные «проводнички» изготовить в избыточном количестве, тогда настройку тепломера можно выполнять «перекусывая лишние» проводочки. В такой

постановке настройка возможна только «в сторону» повышения термического сопротивления тепломера, однако, влияние на R тепломера многочисленных контактных соединений будет минимизировано.

Применительно к рассмотренному здесь варианту исполнения Т/О-Т/М (с болтовыми соединениями) все требования, которые были сформулированы к разработанной и изготовленной конструкции имитатора теплового интерфейса - выполнены. Заданный уровень температуры можно поддерживать стабильно, компенсируемый и измеряемый диапазон тепловых потоков способен «перекрывать» искомый $Q_{ПН}$. В заключительной фазе работ (для которых создан уникальный Т/О-Т/М) будут проведены ТВИ ПН, осуществлен их анализ, а также сформулированы выводы, предметно касающиеся Т/О-Т/М.

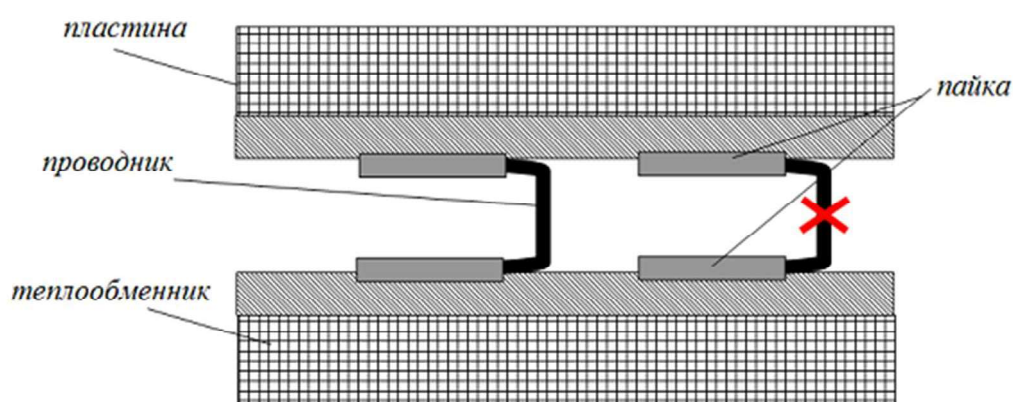


Рис. 8 Схема альтернативного варианта тепломера, создающего основной температурный перепад в конструкции Т/О-Т/М

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Ю. Кочетков, Е.Ю. Котляров, А.Ф. Шабарчин, Е.В. Шеметова «Разработка концепции и расчетно-экспериментальный анализ рабочих характеристик теплообменника-тепломера для проведения тепловакуумных испытаний низкотемпературной полезной нагрузки КА», XXVIII Научно-технич. конференция «Вакуумная наука и техника», Судак, 16-21 сентября 2021 г.
2. Альтов В.В. и др. Тепловое проектирование и пофрагментная наземная отработка системы обеспечения теплового режима космического аппарата негерметичного исполнения на базе сотопанелей с тепловыми трубами. – Космонавтика и ракетостроение, 2010, №3(60), С.33-41
3. Jianyin Miao, Qi Zhong, Qiwei Zhao, Xin Zhao Spacecraft Thermal Control Technologies, 2020, Springer, 372p
4. Чеботарев В.Е., Косенко В.Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2011. 488 с.
5. Дан П.Д., Рэй Д.А. Тепловые трубы пер. с англ.: -М.: Энергия, 1979г. -272с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

А.Ю. Кочетков – начальник отдела тепловакуумных испытаний АО «Научно-производственное объединение имени С.А. Лавочкина», г. Химки Московской обл. e-mail: kochetkov@laspace.ru

Е.Ю. Котляров – кандидат технических наук, ведущий математик, АО «Научно-производственное объединение имени С.А. Лавочкина», г. Химки Московской обл.

А.Ф. Шабарчин – кандидат технических наук, ведущий конструктор, АО «Научно-производственное объединение имени С.А. Лавочкина», г. Химки Московской обл.

Е.В. Шеметова – кандидат технических наук, инженер по испытаниям 1 кат. АО «Научно-производственное объединение имени С.А. Лавочкина», г. Химки Московской обл.