

СЕКЦИЯ 5. ВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ И РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООБМЕННИКА-ТЕПЛОМЕРА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕПЛОВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ КА

CONCEPT DEVELOPMENT, CALCULATING AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE HEAT EXCHANGER AND HEAT LOAD METER OPERATING CHARACTERISTICS FOR IMPLEMENTATION OF THERMAL VACUUM TESTS WITH LOW TEMPERATURE LOAD FOR SPACE APPLICATION

А.Ю.Кочетков, Е.Ю.Котляров, А.Ф.Шабарчин, Е.В.Шеметова / kochetkov@laspace.ru

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

АО "НПО Лавочкина" г. Химки

Предложена концепция тепломера для измерения тепловой нагрузки, поступающей к системе обеспечения теплового режима (СОТР) от научного оборудования, функционирующего при температуре минус 100 °С. Стабильная температура обеспечивается за счёт фазового перехода жидкость-пар. Для удержания заданной температуры применяется нагреватель.

The concept of a heat meter is proposed to measure the heat load coming to the interface of thermal control system (TCS) from scientific equipment operating at a temperature of minus 100C. A stable low temperature level is maintained by controlled phase transition of liquid nitrogen flow. The heater is applied to maintain the required set temperature.

Ключевые слова: тепломер, стабилизация температуры, нагреватель.

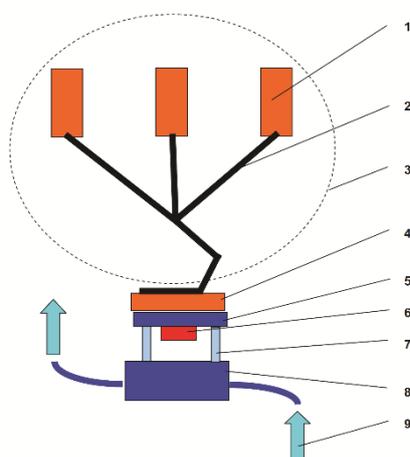
Keywords: heat meter, set temperature, thermal control, heater.

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При проектировании и создании систем обеспечения теплового режима (СОТР), входящих в состав космического аппарата (КА), принято определять параметры, так называемых, тепловых интерфейсов. Термин «тепловой интерфейс» относительно современный и заимствованный из международных проектов, но по смыслу, в форме требований, он описывает тепловые граничные условия в зоне стыка (взаимодействия) subsystem, что применяется, в процессе выполнения работ по созданию СОТР КА, с давних времен. В качестве взаимодействующих subsystem могут выступать приборная панель и единичный прибор, сборка оборудования и теплоотводящий тракт и т.п. В нашем случае, интерфейс представляет собой плоскую контактную поверхность, имеющую габариты 140x80 мм, к которой с помощью тепловых труб от полезной нагрузки (ПН) поступает тепловой поток не более 15 Вт, если температура на данной поверхности составляет около минус 110°С. Вторая subsystem представляет собой теплоотводящий тракт, т.е. отдельную СОТР, которая отводит указанный тепловой поток в окружающую среду. Для обеспечения заданных условий функционирования ПН в составе КА температура на стыке двух subsystem (ПН и СОТР) должна быть не выше минус 110°С.

Дополнительно оговариваются условия механического соединения subsystem, влияющие на тепловой режим, в частности, устанавливаются требования к усилию прижатия контактирующих поверхностей, применению заполнителя в контактном зазоре и т.п. Перед тем, как соединить СОТР с ПН отдельно проверяют то, что СОТР отводит не менее 15 Вт, а ПН подводит не более 15 Вт при заданной граничной температуре.

Пофрагментные тепловакуумные испытания, в процессе работ по созданию систем терморегулирования КА, применяют достаточно часто [1]. Это необходимо для проектирования СОТР, а также для последующей диагностики теплотехнических характеристик subsystem. Ниже, на рис. 1, показана принципиальная схема «постановки» автономных испытаний полезной нагрузки, как subsystem. В составе ПН имеется три источника тепловыделения, а также три теплопроводящих соединения, которые «доставляют» все выделяемое тепло к общему (рассматриваемому здесь) интерфейсу. Вместе с собственным тепловыделением сборка ПН получает паразитные тепловые «натечки» на транспортные участки и элементы конструкции ПН. Все тепловые потоки от ПН к интерфейсу, в штатном варианте, должна отводить СОТР КА, однако, в случае автономных испытаний ПН, отвод тепла планируется выполнять с помощью теплообменника-тепломера.



- 1- источники тепловыделения
- 2- теплопроводы на базе тепловых труб
- 3- теплоизолированная конструкция сборки ПН
- 4- элемент контактного интерфейса со стороны ПН
- 5- имитатор контактного интерфейса со стороны СОТР
- 6- компенсационный нагреватель
- 7- основные элементы тепломера
- 8- азотный теплообменник
- 9- вход жидкого азота

Рис. 1. Схема автономных испытаний низкотемпературной ПН.

Контактный интерфейс со стороны ПН имеет габариты 140x85 мм и выполнен из алюминиевого сплава. Ответный контактный интерфейс также представляет собой параллелепипед из алюминиевого сплава с плоской контактной поверхностью соответствующих размеров. Механическое соединение контактной пластины и теплообменника выполнено «на болтах» и, по сути, является тепломером. Далее показано, что рабочий перепад температур на тепломере в течение испытаний должен поддерживаться практически неизменным, поэтому устройство (теплообменник-тепломер) снабжено компенсационным нагревателем, 6, установленным на контактной пластине тепломера, с внутренней стороны.

Особенности решаемой здесь технической задачи можно охарактеризовать тем, что при проведении автономных испытаний полезной нагрузки (ПН), теплообменник-тепломер должен обеспечить поддержание заданной температуры на интерфейсе с ПН и, одновременно, осуществить измерение отводимого от ПН (через интерфейс) теплового потока.

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ОТ ПН

Предварительный анализ возможностей применения низкотемпературных лабораторных термостатов (которые можно приобрести на коммерческой основе), а также опыт использования собственного «парка» стендового оборудования для проведения подобных испытаний показал следующее:

- использование регулируемых термостатов, организованных на базе промежуточных циркулирующих однофазных низкотемпературных теплоносителей, существенно усложнит и удорожит как стендовое оборудование, так и сами испытания ПН. Кроме того, существенно возрастет время на подготовку испытательного стенда;
- попытки стабильно поддерживать различные температуры в диапазоне (-150...-80°C) с помощью прямой подачи двухфазного азота в контактный теплообменник (из удаленно размещенных сосудов Дьюара), характеризуются затруднениями, выраженными в неуправляемых изменениях режимов течения двухфазного азота.

Опыт измерения небольших тепловых потоков для низкотемпературных ПН и агрегатов показал, что наиболее предпочтительными и доверительными способами измерения теплового потока являются стационарный метод (по установившейся разности температур на «калиброванном» термическом сопротивлении) и метод регулярных режимов (нестационарный). Точность калориметрического способа, по измерению расхода и разности температур теплоносителя, (для малых потоков) является неудовлетворительной. В нашем случае, измеряемый тепловой поток строго привязан к температурному состоянию ПН, поэтому применение метода регулярного режима (т.е. нестационарного) также можно считать неоправданным.

Предлагаемая здесь концепция измерения теплового потока основана на следующих принципах:

- в контактном теплообменнике следует поддерживать минимальную температуру, которую можно достичь с помощью сквозной проливки жидкого азота. Расход азота должен быть настолько велик, чтобы теплообменник (термоплата) был малочувствителен к изменению тепловой нагрузки и воздействию стендовых теплопритоков, имеющих место в данных испытаниях. Допустим, такая температура составляет минус 180°C;
- тепломер, соединяющий теплообменник с тепловым интерфейсом должен создавать температурный перепад, значительно превышающий температурные осцилляции, связанные с испарением/кипением и режимами течения азота в теплообменнике. В нашем случае этот перепад ограничен значениями минус 110°C (сверху) и минус 180°C (снизу), т.е. может достигать не более 70 К;
- поскольку точное значение теплового потока от ПН неизвестно, т.е. является искомым, на интерфейсе должен быть установлен нагреватель, заведомо большего номинала (чем все тепло поступающее от ПН), который постоянно будет поддерживать стабильную температуру минус 110°C на интерфейсе;
- зная мощность нагревателя, которая необходима для поддержания температуры интерфейса на уровне минус 110°C, при отсутствии ПН и, снижая мощность данного нагревателя после присоединения ПН (до достижения указанной температуры), получим из разности двух значений мощности составляющую, поступающую от ПН. Т.е. мощность ПН заменит/компенсирует часть мощности стендового нагревателя для удержания заданной температуры минус 110°C.

Разумеется, тепломер должен быть предварительно «откалиброван», а в его конструкции (до проведения испытаний с ПН) не допускается производить никаких изменений, включая сборочные процедуры, при которых могут измениться внутренние термические сопротивления (в сборке «теплообменник-тепломер»).

Формально, предлагаемую идею измерения теплового потока $Q_{ПН}$, поступающего от низкотемпературной полезной нагрузки можно представить так:

$$Q_{ПН} = \frac{T_{ИФ} - T_{ТО}}{R_{ТМ}} - W_{Н}(T_{ИФ})$$

где $T_{ИФ}$ – температура пластины интерфейса, °С (со стороны тепломера, она должна поддерживаться на уровне минус 110°С); $T_{ТО}$ – температура массива теплообменника в зоне поверхности теплоподвода, °С; $R_{ТМ}$ – термическое сопротивление тепломера, определяемое экспериментально, К/Вт; $W_{Н}$ – мощность компенсирующего нагревателя, Вт, которую подбирают для достижения заданной температуры $T_{ИФ}$.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ С ТЕПЛООБМЕННИКОМ-ТЕПЛОМЕРОМ

Для проведения вычислительного эксперимента с теплообменником-тепломером, реализующим предложенную концепцию измерения $Q_{ПН}$, была разработана математическая модель, показанная на рис. 2.

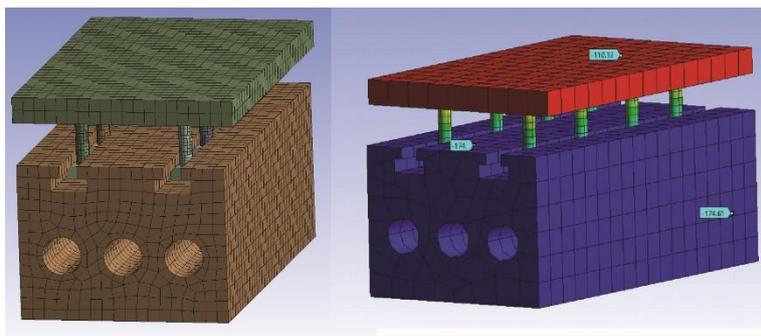


Рис. 2. МКЭ-модель теплообменника-тепломера, разработанная для проведения вычислительного эксперимента.

Здесь 8 болтовых соединений удерживают пластину-имитатор контактного интерфейса СОТР и обеспечивают ее соединение с азотным теплообменником. Количество болтов и материал, из которого они сделаны, можно менять при необходимости, для получения заданного теплового потока от интерфейса к теплообменнику (ТО). Предварительный анализ показал, что контактные сопротивления, в местах соединения болтов с массивом металла, дают существенный, а иногда доминирующий вклад в «калибруемое» термическое сопротивление, т.е. точное значение термосопротивления тепломера предстоит определять «по факту». С этой точки зрения, возможность изменять количество болтов крайне необходима для выполнения успешного эксперимента с ПН, в дальнейшем.

Определим лучистую составляющую теплового потока, которая может поступать через тепломер:

$$Q = \frac{\sigma \cdot F}{\frac{2}{\varepsilon} - 1} \cdot ((T_1 + 273)^4 - (T_2 + 273)^4) = \frac{5.67 \cdot 10^{-8} * 0.14 * 0.085}{\frac{2}{0.1} - 1} \cdot ((273 - 110)^4 - (273 - 180)^4) \approx 0.022 \text{Вт}$$

Здесь, излучательную способность ε не более 0.1 с каждой стороны можно обеспечить, расположив один единичный экран ЭВТИ на самом теплообменнике, а другой

- на внутренней стороне контактной пластины теплообменника-тепломера. Поток через ЭВТИ в зону тепломера, т.е. с боков болтов удерживающих пластину, можно оценить как

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{ЭВТИ}}} \cdot F = \frac{(-110) - (-180)}{30} \cdot (0.03 \cdot 0.15 \cdot 4) < 0.042 \text{ Вт}$$

Таким образом, теплопритоками и лучистым тепловым потоком (в зоне доминирующего перепада температур) можно пренебречь.

Для теплообмена с потоком жидкого азота рассмотрим условно пессимистический вариант, т.е. ситуацию, когда паросодержание на входе в ТО равно нулю (чего, собственно, и планируется добиваться при выборе расхода подаваемого азота в испытаниях). Коэффициент теплопередачи в соответствии с [2] можно, в этом случае, определить по формуле Михеева

$$Nu = 0.021 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.43} \cdot \left(\frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{см}}} \right)^{0.25} \cdot \varepsilon_l$$

Пренебрегая разностью температур жидкости и стенки, а также влиянием длины гидравлического тракта ТО, приблизительно получим

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} = \frac{0.021 \cdot (808 \cdot 0.164 \cdot 0.02)^{0.8} \cdot (0.000168 \cdot 1970)^{0.43} \cdot 0.136}{0.000168^{0.8} \cdot 0.136^{0.43} \cdot 0.02} = 478 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$$

Значение расхода и условный диаметр канала заданы приблизительно на основе данных, полученных при автономных ТВИ реального теплообменника (описанных в следующем разделе). Теплофизические свойства N_2 заимствованы из [3, 4]. Простейшую оценку среднего коэффициента двухфазного теплообмена по формуле Кутателадзе выполним согласно рекомендациям [5]

$$\alpha_{\text{ср}} = \alpha_w \cdot \sqrt{1 + \frac{\alpha_{\text{б.о.}}}{\alpha_w}}$$

где $\alpha_{\text{б.о.}}$ представляет оценку к-та теплопередачи при кипении в «большом» объеме, а α_w – для однофазной конвекции жидкости. Экспериментальные оценки для $\alpha_{\text{б.о.}}$ при кипении азота можно найти во многих источниках. Например, из диаграммы представленной в работе [6] к-т теплопередачи при кипении можно определить величиной в диапазоне 500-1000 Вт/м²К. Таким образом, в дополнение к формуле Михеева влияние фазового перехода на α можем оценить как

$$\alpha_{\text{ср}} = 478 \cdot \sqrt{1 + \frac{1000}{478}} = 841 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$$

Температурный потенциал, при котором стабилизируется фазовый переход внутри теплообменника, связан с рабочим давлением внутри. По наблюдениям в различных экспериментах, в которых с помощью жидкого азота обеспечивался теплосъем, давление и температура «удерживаются» в рабочих объемах небольших термоплат не стабильно, т.к. объективно имеет место скачок гидравлического сопротивления и изменение внешнего теплового воздействия на поток теплоносителя/хладагента (по отношению к потерям в магистрали доставки азота). Предположим, что давление в ТО ниже, чем в сосуде Дьюара на 0.4 бар, тогда, используя уравнение Клазиуса-Клапейрона, можем приблизительно оценить изменение температуры насыщения

$$\Delta T \approx \frac{T \cdot (\rho' - \rho'')}{r \cdot \rho' \cdot \rho''} \cdot \Delta P = \frac{90 \cdot (771 - 9.83)}{188000 \cdot 771 \cdot 9.83} \cdot 50000 = 1.9 \text{ К}$$

Здесь r - теплота испарения, Дж/кг; ρ - плотность, кг/м³; P - давление, Па; T – температура, К. Т.е., например, если температура насыщения на входе в подаваемую магистраль составляет -187°С, то в потоке, дошедшем до теплообменника, она может сместиться к значению -189°С, т.е. незначительно. Для вычислительного эксперимента с

помощью модели по рисунку 2, для обеспечения запаса и в первом приближении, примем температуру низкого температурного потенциала на уровне минус 180°С. В дальнейшем, (с целью обеспечения достоверности), именно при ТВИ, будет оцениваться уровень температурной стабилизации теплообменника в условиях, когда на него оказываются фактические воздействия: осциллирующего давления (в теплоносителе), теплопритоков через крепления и теплоизоляцию, а также тепловой нагрузки от ПН, либо ее имитатора. В результате всех воздействий в металлическом массиве теплообменника будут формироваться температурные градиенты, которые придется учитывать в процессе практического применения теплообменника-тепломера.

Результаты вычислительного эксперимента с использованием МКЭ модели по рисунку 2 позволили определить расчетную величину теплового потока, поступающего от пластины к теплообменнику. Так, в случае применения алюминиевых ($\lambda=115$ Вт/мК) стальных ($\lambda=15$ Вт/мК) и титановых ($\lambda=22$ Вт/мК) болтов, получены потоки, соответственно 55 Вт, 27 Вт и 30 Вт. Как ни странно, все три варианта применимы для поставленной задачи, поскольку компенсируемая нагрузка составляет 15 Вт.

При выполнении расчетов в рамках вычислительного эксперимента применялись следующие граничные условия (задача стационарная):

- величина суммарных теплопритоков распределенных по нетеплонагруженным поверхностям корпуса теплообменника 20 Вт;
- в зоне каналов, охлаждаемых азотом, применяются граничные условия третьего рода: температура минус 180°С и $\alpha=500$ Вт/м²К;
- на стыке тепломера с ПН применяются граничные условия первого рода ($T =$ минус 110°С);
- материалы пластины и теплообменника - алюминиевый сплав ($\lambda=115$ Вт/мК);
- коэффициент теплопередачи в местах контактов болтов с теплообменником и с интерфейсной контактной пластиной 15000 Вт/м²К.

Ошибка в определении величин контактных термических сопротивлений (в местах контактного взаимодействия болтов с элементами конструкции), наиболее существенно скажется на фактических характеристиках тепломера. Однако, подбором количества болтов и выполнением заданных требований к их установке планируется добиться необходимого перепада температур на конструкции теплообменника-тепломера при величине передаваемой мощности в диапазоне 30-60 Вт и заданном уровне температуры. Как показали результаты, выполненные с помощью 3D-модели расчетов - это решаемая задача.

ИСПЫТАНИЯ ПРОТОТИПА ТЕПЛООБМЕННИКА

Прототип азотного теплообменника, использованного для проведения ТВИ, показан на рисунке 3. С его помощью авторы планировали подтвердить, что подача азота с низким паросодержанием позволит удерживать температуру теплообменника на уровне близком к температуре фазового перехода, а также приемлемо стабилизировать эту температуру.

В процессе ТВИ данного теплообменника азот подавался с расходом величиной 150 кг/час (расход, примерно, раз в час определялся по суммарной массе израсходованного из сосуда Дьюара азота). Для того, чтобы обеспечить условия гарантированного фазового перехода (кипения) во внутренних каналах теплообменника, оператор испытаний обеспечивал визуальный контроль «выливания жидкого азота» из дренажного шланга на выходе из вакуумной камеры (ВК), в которой был установлен испытываемый теплообменник.

Расход величиной 150 кг/час позволяет снимать нагрузку, только за счет испарения жидкого азота, порядка $m \cdot r = 150/3600 \cdot 188000 \approx 7800$ Вт. Некоторая часть данной хладопроизводительности «истрачена» на компенсацию теплопритоков в многометровой магистрали подачи жидкого азота к вакуумной камере (ВК), однако,

поскольку на выходе из линии (дренаж из теплообменника) всегда идет жидкий азот, можно говорить о значимом запасе хладопроизводительности в самом теплообменнике, который предназначен для снятия лишь десятков Ватт.

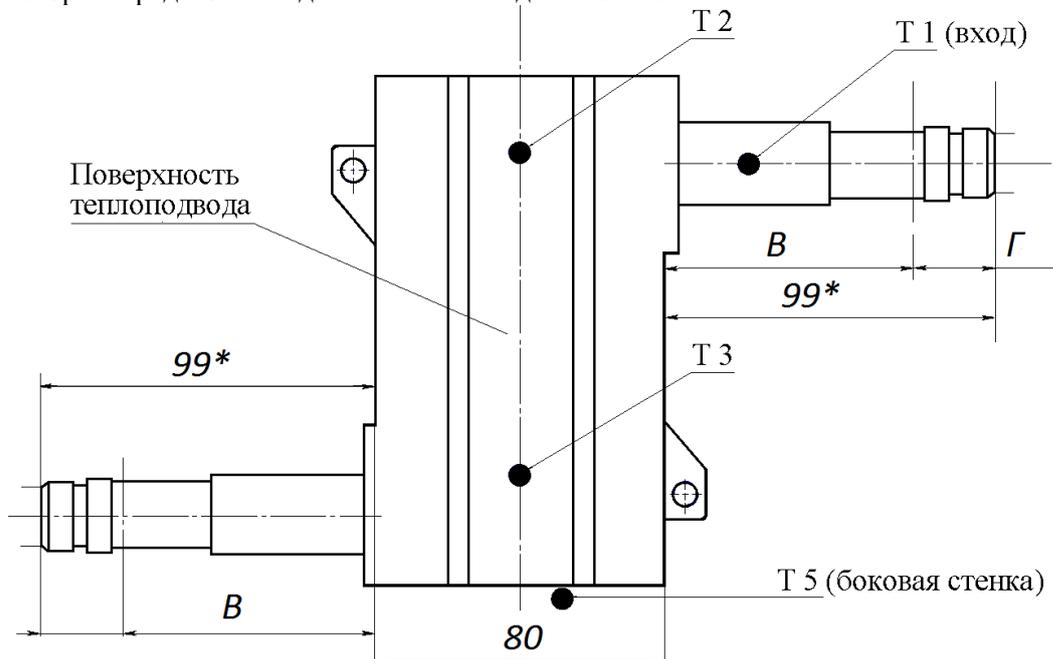


Рис. 3. Прототип теплообменника, изготовленный для тепловакуумных испытаний.

На рис. 4 показано, насколько стабильно поддерживается температура теплообменника во время испытаний протяженностью около 6 часов при изменении мощности нагревателя имитирующего поток со стороны ПН. Уровень теплопритоков к теплообменнику (оценка из сторонних работ) можно оценить величиной 8 Вт через ЭВТИ и величиной 12 Вт через крепления. Максимальная мощность, подводимая к электронагревателю, имитирующему полезную нагрузку, составила 80 Вт.

Как видно из рисунка 4, в испытаниях мощность к теплообменнику подводилась «ступеньками». При этом, устанавливались значения 20, 40, 60 и 80 Вт. Судя по построенным кривым, уровень температуры корпуса и поверхности теплоподвода в большей степени определяется охлаждающим потоком, чем воздействием нагревателя. Средняя температура на рабочей поверхности теплообменника около минус 175°С, зарегистрированный разброс температуры по теплообменнику порядка 10 К, но на поверхности теплоподвода он меньше. Амплитуда осцилляций, в среднем, порядка 2 К, при этом, с учетом планируемого рабочего перепада на тепломере 50-60 К и с учетом высокой частоты осцилляций данный фактор можно считать допустимым, не препятствующим достоверному измерению теплового потока от ПН. Дополнительный график, построенный на поле основного (см. рисунок 4), показывает в увеличенном масштабе осцилляции температуры, полученные для режима 60 Вт.

Анализируя выполненные измерения, а также представленные расчетные оценки, можно сделать вывод о том, что причина сравнительно высокой температуры (стабилизации), регистрируемой на теплообменнике, объясняется не наличием градиента температуры по корпусу, не теплопритоками к нему и не снижением коэффициента теплопередачи (от теплоносителя к корпусу), а в основном, обусловлена наличием перегрева, поступающего в теплообменник жидкого теплоносителя, по отношению к

равновесной температуре фаз (перегрев происходит в процессе транспортирования азота по магистрали).

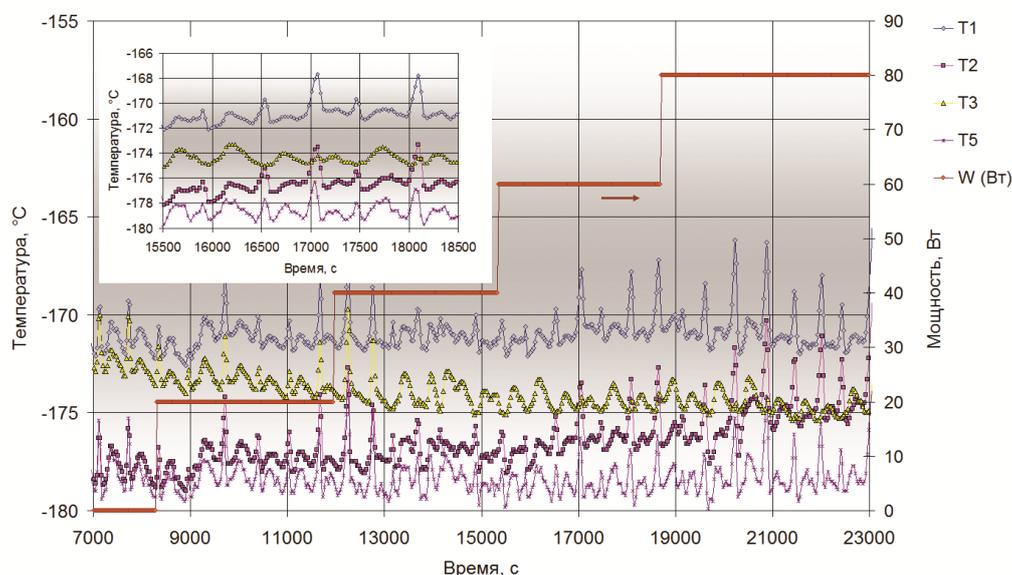


Рис. 4. Результаты тепловвакуумных испытаний низкотемпературного азотного теплообменника.

По результатам ТВИ теплообменника можно сделать заключение о том, что предлагаемая концепция поддержания заданной температуры интерфейса с одновременным измерением теплового потока от ПН является эффективной и осуществимой.

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ТВИ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ

Как уже говорилось методика определения теплового потока от ПН построена на стабильном поддержании двух температурных потенциалов, а именно, кипения азота в теплообменнике, с одной стороны, и требуемой температуры на интерфейсе минус 110°C, с другой. Для того, чтобы постоянно удерживать температуру минус 110°C в зоне стыка subsystemов нагреватель тепломера должен создать соответствующий перепад на тепломере (самостоятельно), а также и иметь собственную мощность выше мощности поступающей от ПН. Однако, если реальная мощность от ПН будет достигать 40 Вт теплоотводящий тракт, который представляет собой subsystemу, состоящую из теплопроводов и РТО придется проектировать заново.

При подготовке испытательного стенда и выполнении ТВИ основными задачами в подготовке теплообменника-тепломера для его применения являются:

- калибровка тепломера, которую целесообразно провести не только для требуемой температуры, но и для отклонений в большую и меньшую стороны. Тогда при испытаниях ПН можно будет выполнить дополнительные режимы испытаний, позволяющие показать как влияет температура интерфейса на поступающий к нему тепловой поток, (а также выполнить интерполяцию для установления точного соответствия между $Q_{ПН}$ и температурой интерфейса $T = \text{минус } 110^\circ\text{C}$);
- предварительное (экспериментальное) определение количества проводников (болтов) тепломера, обеспечивающих передачу мощности в диапазоне 40-60 Вт для фиксированных температур интерфейса и теплообменника;
- поддержание стабильного режима течения азота в магистрали, обеспечивающей через теплообменник поток жидкого азота с низким паросодержанием. При этом, важно

определить условия стабильности и повторяемости режима доставки азота к теплообменнику-тепломеру.

ВЫВОДЫ

В процессе определения концепции теплообменника-тепломера авторами разработана методика экспериментальной отработки низкотемпературной полезной нагрузки космического аппарата. На базе тепловакуумных испытаний прототипа теплообменника и вычислительного эксперимента выполнена комплексная работа, доказывающая применимость данного подхода, в части использования теплообменника работающего на жидком азоте и тепломера с компенсационным нагревателем. Разработана конструкция теплообменника-тепломера, определен обобщенный сценарий проведения тепловакуумных испытаний (ТВИ). Реализация технических решений, представленных здесь, позволит повысить качество проведения ТВИ различных низкотемпературных полезных нагрузок, в виде автономных ПН КА, а также понизить стоимость таких испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альтов В.В. и др. Тепловое проектирование и пофрагментная наземная отработка системы обеспечения теплового режима космического аппарата негерметичного исполнения на базе сотовых панелей с тепловыми трубами. – Космонавтика и ракетостроение, 2010, №3(60), С.33-41
2. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи, - М.: Энергия, 1973. -320с.
3. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей, М.: Наука, -1972г. -721с.
4. Дан П.Д., Рэй Д.А. Тепловые трубы пер. с англ.: -М.: Энергия, 1979г. -272с.
5. Данилова Г.Н. Теплообменные аппараты холодильных установок. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1986. – 303 с.
6. Делов М.И., Куценко К.В., Лаврухин А.А. Влияние ориентации теплоотдающей поверхности на теплоотдачу к жидкому азоту. -Краткие сообщения по физике ФИАН, №7, 2014, С.25-30
7. <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student>, 02/2021