

А.А. Басов, канд. техн. наук (ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва», г. Королёв);
В.И. Велюханов; *К.А. Коптелов* (ООО «Фриготрейд», г. Москва);
А.А. Пациевский (ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва», г. Королёв)

АДАПТИРУЕМЫЙ КОМПЛЕКС НАЗЕМНОГО ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПАНЕЛЬНОЙ КОМПОНОВКИ

Приводится описание комплекса наземного термостатирования, состоящего из адаптивного воздухораспределительного устройства и малогабаритной средненапорной установки воздушного термостатирования. Рассматривается метод газодинамического термостатирования негерметичных космических аппаратов (КА). Представляется методика расчёта сопел-форсунок и определяются требования к их компоновке на воздухораспределительных секциях установки, обеспечивающих подачу воздуха с различным расходом на тепловыделяющее оборудование испытываемого КА. Описывается установка подготовки воздуха, работающая в рассматриваемой системе. Представляются результаты испытаний воздухораспределительного устройства.

Ключевые слова: наземное термостатирование, КА панельной компоновки, воздухораспределительное устройство.

A.A. Basov, V.I. Velyukhanov, K.A. Koptelov, A.A. Patsievsky. Adaptive Complex of Panel-Based Spacecraft Thermostabilization During Ground Tests. Thermostabilization complex used during tests description is presented in this paper. Thermostabilization complex consists of adaptive air distribution unit and compact average-pressure air thermostabilizing plant. Here is considered method of gas-dynamic thermostabilization of non-hermetic spacecraft, proposed the way of calculation of nozzle-injectors and requirements to their assembling on air-distribution sections of thermostabilization plant providing air supply with different air flow for heat-generating equipment of the spacecraft to be tested, and also described thermostatic air preparation unit. There given tests results of air distribution unit.

Key words: on-ground thermostabilization, panel-based spacecraft, air-distribution unit.

В соответствии с традиционной для РКК «Энергия» схемой воздушного термостатирования автоматических КА при наземных электрических испытаниях предполагается подача низконапорного воздуха вдоль поверхностей теплосъёма и равномерное распределение этого воздуха по внутреннему объёму КА. Подготовка и подача термостатирующего воздуха производится с использованием установок типа УОК-2 по воздуховодам диаметром d_y 200 с напором не более 50 – 100 мм вод. ст. Воздух подаётся в канал, образованный корпусной панелью-радиатором и внутренней поверхностью технологического кожуха, устанавливаемого на эту панель. С помощью отдельного воздуховода производится подача воздуха во внутренний объём КА. В среднем для отвода 1 кВт избыточного тепла при

использовании этой схемы было необходимо обеспечить подачу на соответствующую поверхность примерно $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ термостатирующего воздуха. Одним из существенных минусов такого подхода является невозможность перераспределения потока охлаждающего воздуха в зависимости от изменения топографии тепловыделяющих зон КА.

Обязательным требованием к системе наземного термостатирования является исключение конденсации атмосферной влаги как внутри, так и снаружи КА, а также на испытательной оснастке. Поэтому для увеличения тепловыделения бортовой аппаратуры в какой-либо отдельной зоне КА в процессе наземных испытаний требовалось увеличение общего расхода охлаждающего воздуха на установке наземного термостатирования. В рамках такого подхода перед разработчиками была поставлена задача создания мощных установок наземного воздушного термостатирования с большими габаритами, массой и энергопотреблением. Например, для установки, подающей $4500 \text{ м}^3/\text{ч}$ низконапорного термостатирующего воздуха, требовалось не менее 67 кВт электроэнергии при габаритах $4400 \times 2300 \times 2300 \text{ мм}$ и массе 3500 кг . Стоимость такой установки в ценах 2017 г. составляла, по нашим оценкам, 14 – 20 млн руб. без учёта затрат на техобслуживание. И если их применение оправданно при наземных испытаниях крупногабаритных обитаемых орбитальных станций и пилотируемых КА, то при испытаниях небольших беспилотных, в том числе негерметичных КА различного назначения, использование таких больших установок становится нецелесообразным с точки зрения достоверности результатов испытаний и энергоэффективности.

Для повышения энерговооружённости нового поколения негерметичных КА панельной компоновки с децентрализованной системой обеспечения теплового режима (СОТР) при неизменных геометрических размерах потребовалось использовать для размещения тепловыделяющей аппаратуры практически всю поверхность традиционного для КА типа «Ямал-200» корпуса, имеющего форму параллелепипеда.

Циклограмма работы различного бортового оборудования нового поколения негерметичных КА панельной компоновки, особенно КА связи, обусловила необходимость размещения тепловыделяющего оборудования в значительно отличающихся по тепловой нагрузке индивидуальных зонах терморегулирования, в том числе в границах одной корпусной панели КА.

В ходе наземных испытаний, особенно с учётом работы бортовой аппаратуры в различных режимах, при применении такого подхода возникают значительные сложности в случае использования традиционной схемы воздушного термостатирования КА.

При проведении наземных тепловых и электрических испытаний негерметичных КА нового поколения была поставлена задача разработки метода зонального термостатирования, при котором каждый испытываемый КА условно делится на определённое количество термостатируемых зон с тепловыделяющим оборудованием с различным тепловыделением, соответственно с разным расходом охлаждающего воздуха. Специалистами РКК «Энергия» был разработан новый метод газодинамического термостатирования негерметичных КА панельной компоновки, сформулированы требования к компоновке сопел-форсунок на воздухомасштабных секциях и к геометрическим параметрам самих секций применительно к конструкции конкретного КА, а также к количеству зон с различным тепловыделением.

На конструкцию секционного воздухораспределителя термостатирующего воздуха для панельного КА получен патент РФ №2673213 [1]. Сам способ подготовки воздуха для газодинамической системы термостатирования КА и установка для его реализации защищены совместным патентом РФ № 2657603 на имя ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва» и ООО «Фриготрейд» [2].

Система газодинамического наземного термостатирования включает в себя установку подготовки и подачи термостатирующего воздуха и соединённое с ней теплоизолированными воздухопроводами воздухораспределительное устройство с соплами-форсунками. Кратко рассмотрим эти два основных элемента газодинамической системы наземного термостатирования.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТАНОВКИ ПОДГОТОВКИ И ПОДАЧИ ТЕРМОСТАТИРУЮЩЕГО ВОЗДУХА

Установка подготовки и подачи термостатирующего воздуха (рис. 1) выполнена в виде смонтированного на раме мобильного моноблока, разделённого внутри на нижнюю зону холодильной установки с конденсатором и компрессором и верхнюю зону обработки воздуха с воздухоохладителем,

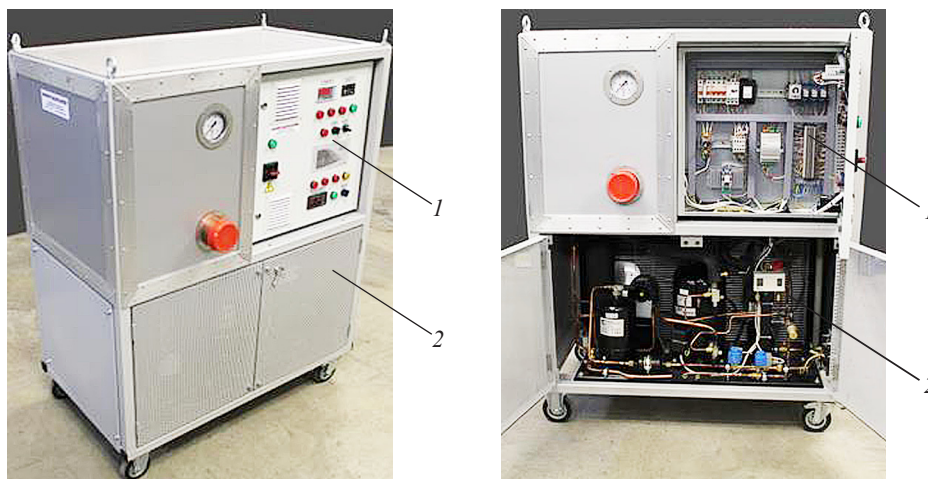


Рис. 1. Общий вид установки подготовки и подачи термостатирующего воздуха «Фригодизайн УВТ-FCA-5-TAG»¹⁾:

1 – зона обработки воздуха с воздухоохладителем, нагревателем и высоконапорным вентилятором; 2 – зона холодильной установки с конденсатором и компрессором

нагревателем и высоконапорным вентилятором. Для снижения теплообмена с окружающей средой и шума при работе вентилятора на всех стенках зоны подготовки воздуха установлена теплозвукоизоляция. При работе холодильной установки температура на поверхности её воздухоохладителя поддерживается системой управления на уровне, обеспечивающем его охлаждение и осушку термостатирующего воздуха до расчётных значений. Высоконапорный вентилятор при работе создаёт разрежение в верхней зоне установки, и воздух из окружающего пространства, проходя через воздухоохладитель, охлаждается, осушается, после чего при необходимости подо-

¹⁾ «Фригодизайн» – зарегистрированная торговая марка оборудования, выпускаемого ООО «Фриготрейд».

гревается электрическим нагревателем и попадает на вход вентилятора. Воздух на термостатирование забирается из зала испытаний, а с учётом того, что испытания проводятся в зале с чистотой воздуха не ниже класса P8 по ГОСТ Р ИСО 14644-1-2002 и при температурах 20 – 25 °С, установка получилась компактной и удобной в эксплуатации [3].

Окончательный подогрев воздуха до заданной температуры осуществляется внутри самого вентилятора за счёт сжатия воздуха. В таких вентиляторах в зависимости от напора и расхода воздух может нагреваться на 4 – 15° С относительно его температуры на входе, и это необходимо учитывать при расчёте подобных установок.

Установка подготовки и подачи термостатирующего воздуха «Фригодизайн УВТ-FGA-5-TAG» позволяет выдавать в приборные отсеки термостатируемых изделий воздух с такими параметрами:

Температура воздуха на выходе из установки	+12 ÷ +25° С
Диапазон плавно регулируемого расхода	100 ÷ 400 м ³ /ч
Диапазон регулируемого напора воздуха	100 ÷ 600 мм вод. ст.
Погрешность поддержания температуры	не более 1°С
Погрешность поддержания расхода воздуха	не более 6 м ³ /ч
Относительная влажность воздуха на выходе	не более 75%

Указанная средненапорная установка успешно подтвердила свои характеристики при электротехнических наземных испытаниях негерметичных КА нового поколения, разрабатываемых в ПАО «РКК «Энергия».

Необходимо отметить, что при использовании для наземного термостатирования средненапорных малорасходных установок применительно к КА с панельной компоновкой приборно-агрегатного оборудования важно не только подать поток воздуха с заданной температурой и расходом, но и обеспечить равномерное или регулируемое поле скоростей в зоне термостатирования. Поэтому обязательным условием является использование воздухо-распределительных устройств, связанных с установкой комплектом тепло-изолированных воздуховодов.

ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ТЕРМОСТАТИРУЮЩЕГО ВОЗДУХА С СОПЛАМИ-ФОРСУНКАМИ

Исходя из указанных целей специалистами РКК «Энергия» было разработано адаптируемое к геометрическим параметрам объекта испытаний воздухо-распределительное устройство для термостатирующего воздуха, представляющее собой пространственную конструкцию из жёстких воздухо-распределителей со встроенными в них соплами-форсунками (рис. 2), выполненными из полиамида методом 3D-печати и закреплёнными на определённом расстоянии друг от друга. Равномерность подачи воздуха регулируется сменными дроссельными вставками внутри форсунок. Воздухо-распределители объединяются с помощью коллектора в секции (рис. 3) воздухо-распределительного устройства. Основным материалом распределителей и секций является полипропилен. Использование неметаллов в конструкции средств газодинамического охлаждения позволило обеспечить испытания КА в безэховой камере.

Изменяя длину каждого воздухо-распределителя и количество секций воздухо-распределительного устройства, а также проходные сечения сопел-

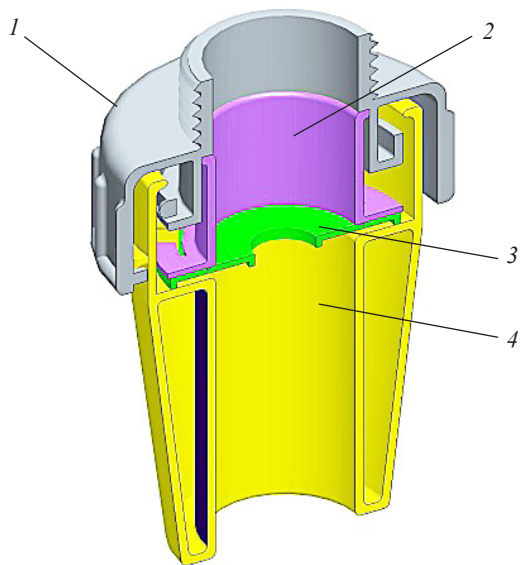


Рис. 2. Конструкция сопла-форсунки:
 1 – крышка; 2 – втулка; 3 – сменный дроссель; 4 – сопло

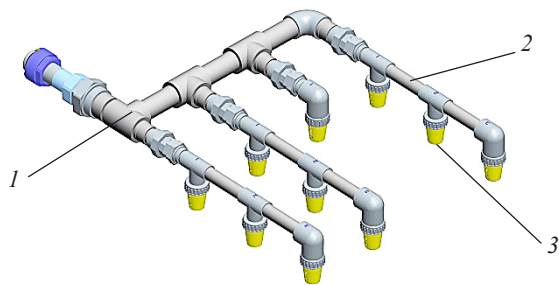


Рис. 3. Воздухораспределительная секция:
 1 – коллектор; 2 – распределитель;
 3 – сопло-форсунка

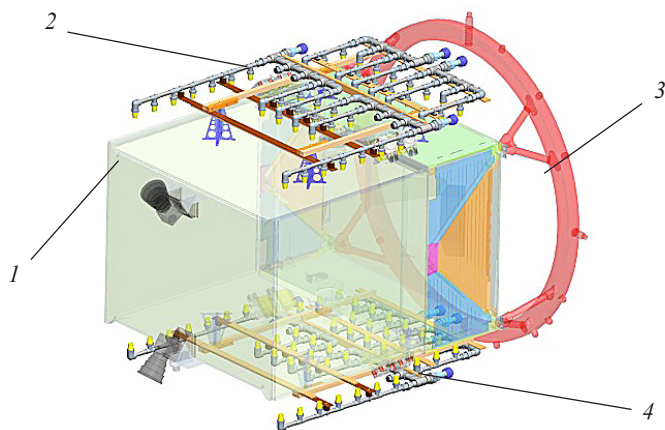


Рис. 4. Схема расположения сопел-форсунок установки газодинамического термостатирования КА связи:
 1 – КА «Ангосат»; 2, 4 – устройства воздухо-распределения; 3 – опорное кольцо

форсунок, можно легко варьировать интенсивность охлаждения локальных зон приборных панелей КА [4]. Совокупность секций воздухораспределителя образует воздухораспределительное устройство, разное у каждого КА. Например, для КА связи потребовалось объединить 6 секций, для КА дистанционного зондирования Земли только 3.

Упрощённая схема размещения сопел-форсунок секций воздухораспределителей для наземного газодинамического термостатирования КА связи приведена на рис. 4.

Расчёт параметров сопел-форсунок, расстояний между ними на распределителе, шаг распределителей в пределах секции производился по соотношениям для газодинамических расчётов [5]. Приведём основные зависимости для выбора параметров воздухораспределителя и результаты расчётов.

Коэффициент теплоотдачи применительно к локальной зоне тепловыделения приборной панели вычисляется по формуле

$$\alpha(\text{Re}) = \text{Nu}(\text{Re}) \cdot \frac{\lambda}{d} = \frac{Q}{F} : (t_{\text{п}} - t_{\text{возд}}),$$

где $\text{Nu}(\text{Re}) = 0,285\text{Re} \cdot 0,71\text{Pr} \cdot 0,33 \left(\frac{H}{d} \right) - 0,123 \left(\frac{s}{d} \right) - 0,725$; Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля, соответствующее воздуху; λ – коэффициент теплопроводности воздуха, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; d – внутренний диаметр сопла, м ; H – расстояние от среза сопла до охлаждаемой поверхности, м ; s – шаг сопел по распределителю, м ; Q – тепловыделение в локальной зоне, Вт ; F – площадь локальной зоны, м^2 ; $t_{\text{п}}$ – допустимая температура локальной зоны панели (0°C); $t_{\text{возд}}$ – температура термостатирующего воздуха (0°C).

Расход воздуха через сопло-форсунку можно определить следующим образом:

$$G_0 = 0,25\text{Re} \cdot \mu \cdot \pi \cdot d,$$

где μ – динамическая вязкость воздуха, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

Подача охлаждающего воздуха перпендикулярно поверхности термостатирования позволяет добиться большей эффективности используемого расхода воздуха по сравнению с традиционной параллельной подачей воздушного потока [6].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Перед практической реализацией воздухораспределителя был произведён ряд испытаний, подтверждающих эффективность принятых решений. В качестве имитатора приборной панели использовалась реальная трёхслойная сотовая панель типового КА с тепловыми трубами. Тепловая нагрузка на панель имитировалась с помощью поверхностных нагревателей. При наземных испытаниях установленного на КА приборного оборудования термостатирующий воздух подаётся на приборные панели-радиаторы перпендикулярно их поверхности. Схема испытательного стенда и размещение имитаторов тепловой нагрузки на панели приведены на рис. 5 и 6 соответственно.

Эксперимент проводился двумя сериями, в каждой серии – по два эксперимента, в ходе одного из которых термостатирование включено, в другом – выключено. В рамках первой серии – режим «рабочий обдув» – предполагалась номинальная мощность тепловыделения электронагревателей на

трёхслойной сотовой панели. В рамках второй серии – режим «интенсивный обдув» – предполагалась увеличенная мощность тепловыделения электронагревателей.

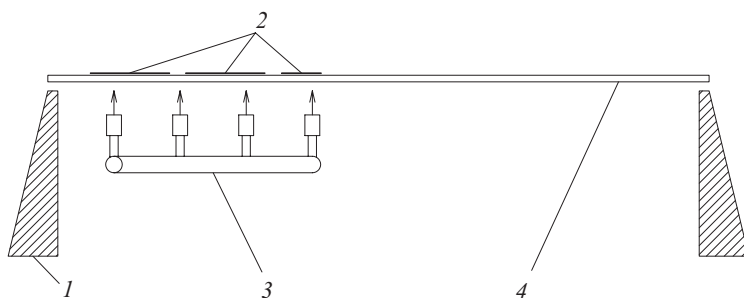


Рис. 5. Схема испытательного стенда:

1 – технологическая подставка; 2 – имитаторы тепловой нагрузки; 3 – воздухораспределительная секция; 4 – трёхслойная сотовая панель с габаритами 2000 × 730 × 20 мм

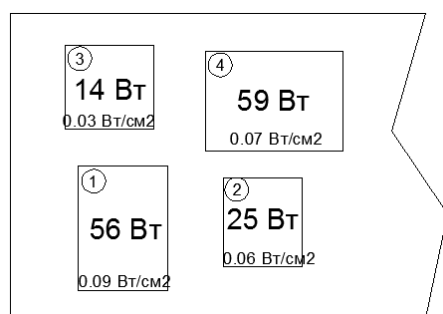


Рис. 6. Размещение имитаторов тепловой нагрузки (нагреваемых пластин) на трёхслойной сотовой панели

Результаты проведённых экспериментов с включённым термостатированием приведены в табл. 1

Т а б л и ц а 1

Сравнение результатов испытаний термостатирования теплоотводящей панели с расчётными данными

Режим	Суммарная мощность тепловыделения, Вт	Расчётное значение температуры панели, °С	Температура панели при экспериментальной отработке, °С
Рабочий обдув	154	32,6	29,6
Интенсивный обдув	243	40,5	35,3

Расчётные значения температуры теплоотводящей панели указаны без учёта теплоотдачи излучением с поверхности панели и получены при следующих параметрах термостатирующего воздуха: температура воздуха на выходе из сопла 18° С; суммарный расход воздуха, подаваемого на теплоотводящую панель, 80 м³/ч; избыточное давление на выходе из установки подготовки и подачи воздуха не более 100 мм вод. ст. Значение скорости воздуха на срезе сопла при рабочем обдуве должно быть не менее 2,6 м/с.

Создаваемый установкой напор термостатирующего воздуха до 600 мм вод. ст. при расходе до 400 нм³/ч обеспечивает потребности схемы «газодинамического» охлаждения КА при теплосъёме до 1500 Вт. Невысо-

кая стоимость средненапорной установки делает её конкурентноспособной по отношению как к традиционной схеме термостатирования, так и к «газодинамической» схеме, согласно которой используется воздух высокого давления (табл. 2) при обеспечении термостатирования КА с тепловыделением до 5кВт .

Т а б л и ц а 2

Сравнение основных характеристик установок наземного термостатирования и затрат на их эксплуатацию

Наименование установки	Характеристики			Затраты на рабочее тело, тыс. руб.	Затраты на электроэнергию, тыс. руб.	Стоимость установки, тыс. руб.
	Энергопотребление, кВт	Напор, мм вод. ст.	Расход, $\text{лм}^3/\text{ч}$			
Низконапорная установка (традиционная схема)	67,8	100	4500	–	~ 1020	14000
Пневмопулт («газодинамическая» схема, от сети высокого давления)	18,0	Более 600	450	56000	~ 270	2000
Средненапорная установка для реализации «газодинамической» схемы	8,0×3шт.	600	400×3шт.	–	~ 366	1500×3шт.

Подача подготовленного термостатирующего воздуха через специально профилированные сопла в направлении, перпендикулярном охлаждаемой поверхности, позволяет в 3 – 5 раз интенсифицировать теплообмен и соответственно снизить расход охлаждающего воздуха, а само воздухораспределительное устройство даёт возможность легко переконфигурировать схему подачи воздуха на термостатируемые поверхности КА в зависимости от режимов работы тепловыделяющего оборудования при испытаниях, что также позволяет снизить потребности в термостатируемом воздухе и для чего не требуется установка на КА дополнительных технологических конструкций типа кожухов и коллекторов воздухораспределения.

Отличительной чертой воздухораспределителя, построенного по «газодинамической» схеме, являются существенно меньшие диаметры подводящих трубопроводов ($d_y 25 - d_y 40$) и значительное количество мест локальных гидросопротивлений (тройники, повороты на 90° , переходные муфты и т. п.), что приводит к возрастанию гидравлического сопротивления воздуховодного тракта и не позволяет использовать для рассматриваемого газодинамического термостатирования традиционные низконапорные установки типа УОК-2.

Проведённые расчёты тракта подачи термостатирующего воздуха показали достаточность для термостатирования применительно к данному классу КА напора воздуха на входе в воздухораспределительное устройство в 300 – 500 мм вод. ст.

Испытания подтвердили эффективность предложенной системы газодинамического термостатирования для КА при размещении приборного оборудования вне герметичного отсека на теплоотводящих панелях.

Комплекс наземного термостатирования, состоящий из рассмотренных адаптивного воздухораспределительного устройства и малогабаритной средненапорной установки воздушного термостатирования, обеспечил успешное проведение заводских электроиспытаний вновь разработанных в РКК «Энергия» спутников связи и дистанционного зондирования Земли.

ВЫВОДЫ

Разработанная в РКК «Энергия» методика расчёта сопел-форсунок, в которых регулируются расход и направление движения воздуха, и рекомендации по выбору компоновки этих сопел-форсунок на многосекционных воздухораспределительных устройствах позволяют создавать адаптируемые к конфигурации конкретного КА установки газодинамического термостатирования, обеспечивающие гарантированный теплоотвод от бортовой аппаратуры КА разного назначения при различных уровнях её тепловыделения во время наземных электроиспытаний.

Малогабаритные средненапорные установки воздушного термостатирования, спроектированные и изготовленные компанией «Фриготрейд», с высокой точностью обеспечивают заданные параметры термостатирующего воздуха, подаваемого в секции воздухораспределителя газодинамической системы воздушного термостатирования КА панельной компоновки. Отличительной особенностью установок являются малое энергопотребление и низкий уровень шума при эксплуатации с различными расходами воздуха.

Совместная разработка специалистами РКК «Энергия» и компании «Фриготрейд» воздухораспределителя и установки воздушного термостатирования позволила при полной технической совместимости обеспечить минимизацию финансовых затрат на создание принципиально нового комплекса наземного термостатирования КА панельной компоновки. Созданный комплекс имеет «открытую» архитектуру и даёт возможность легко адаптировать схему термостатирования к панельному КА практически любого назначения и тепловыделения.

Проведённые расчёты и результаты испытаний подтвердили эффективность и гибкость предложенной системы газодинамического термостатирования применительно к КА с приборным оборудованием, размещённым вне герметичного отсека на теплоотводящих панелях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басов А.А., Быстров А.В., Никонов А.В. и др. Средство распределения и подачи термостатирующего воздуха на поверхность панельного космического аппарата при наземных испытаниях. Патент РФ № 2673213. Опублик. 22.11.2018, бюл. № 33.
2. Басов А.А., Никонов А.В., Пацевский А.А. и др. Способ воздушного термостатирования отсеков космических аппаратов при наземных испытаниях и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2657603. Опубл. 14.06.2018, бюл. № 17.
3. Басов А.А., Велюханов В.И., Коптелов К.А. и др. Применение средненапорных установок воздушного термостатирования для охлаждения КА панельной компоновки при наземных испытаниях. – Известия Академии наук. Энергетика, 2018, № 4, с. 116 – 124.
4. Пацевский А.А. Разработка и внедрение установки для обеспечения теплового режима космических аппаратов при наземной обработке способом газодинамического термостатирования. – В тез. докл. XXI научно-технической конференции молодых учёных и специалистов. Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва, 2017, т. 1, с. 220 – 221.
5. Мартыненко О.Г., Михалевиц А.А., Шикоз В.К. Справочник по теплообменникам. М.: Энергоатомиздат, 1987, т. 1, 560 с.
6. Zuckerman N., Lior N. Jet Impingement Heat Transfer: Physics, Correlations and Numerical Modeling. – Advances in Heat Transfer, 2006, v. 39, pp. 565 – 631.