

УДК 629.5.04:629.514

DOI 10.36910/6775.24153966.2021.71.1

С.С. Булавка*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
Машинобудівний навчально-науковий інститут, кафедра Кондиціонування і рефрижерації***РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ ВОЗДУХА РАКЕТ-
НОСИТЕЛЕЙ**

В работе приведены экспериментальные исследования усовершенствованной системы термостатирования воздуха ракет-носителей. Усовершенствованная система термостатирования входит в состав передвижного промышленного кондиционера, который предназначен для подачи термостатирующего воздуха с заданными параметрами в съемное оборудование транспортной системы термостатирования или адаптер оборудования для определения фактических значений характеристик затрат и негерметичности дренажных устройств и отсеков ракет-носителей, или в оборудование системы термостатирования на транспортно-установочном агрегате. Характеристики спроектированного передвижного промышленного кондиционера и усовершенствованной системы термостатирования воздуха ракет-носителей обеспечивают стабильную работу и необходимые показатели качества выполнения основных технических и эксплуатационных характеристик в процессе отработки и применения в условиях космодрома Алкантара.

Ключевые слова: ракеты-носители, космические аппараты, системы термостатирования воздуха, передвижной промышленный кондиционер.

С.С. Булавка**РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ УДОСКОНАЛЕНОЇ
СИСТЕМИ ТЕРМОСТАТУВАННЯ ПОВІТРЯ РАКЕТ-НОСІЇВ**

В роботі наведені експериментальні дослідження удосконаленої системи термостатування повітря ракет-носіїв. Удосконалена система термостатування входить до складу пересувного промислового кондиціонера, який призначений для подачі термостатує повітря із заданими параметрами в знімне обладнання транспортної системи термостатування або адаптер обладнання для визначення фактичних значень показників витрат і негерметичність дренажних пристроїв і відсіків ракет-носіїв, або в обладнання системи термостатування на транспортно-установочному агрегаті. Характеристики спроектованого пересувного промислового кондиціонера і вдосконаленої системи термостатування повітря ракет-носіїв забезпечують стабільну роботу і необхідні показники якості виконання основних технічних і експлуатаційних характеристик в процесі відпрацювання та застосування в умовах космодрому Алкантара.

Ключові слова: ракети-носії, космічні апарати, системи термостатування повітря, пересувний промисловий кондиціонер.

Bulavka S.S.**EXPERIMENTAL RESULTS OF AN ADVANCED THERMOSTAT SYSTEM THE AIR OF
LAUNCH VEHICLES**

The paper presents experimental studies of an improved thermostat system the air of launch vehicles. The advanced temperature control system is part of a mobile industrial air conditioner, which is designed to supply thermostatic air with the specified parameters to removable equipment of the transport thermostat system or equipment adapter to determine the actual values of cost characteristics and leakage of drainage devices and rocket compartments, or to thermostat system equipment on transport and installation unit. The characteristics of the designed mobile industrial air conditioner and the advanced thermostat system the air of launch vehicles provide stable operation and the necessary quality indicators for the performance of the main technical and operational characteristics during development and use in the conditions of the Alcantara cosmodrome.

Key words: launch vehicles, spacecraft, thermostat system the air, mobile industrial air conditioning.

Постановка проблеми. В настоящее время для космической отрасли Украины актуальным является обеспечение конкурентоспособности космических ракетных комплексов (КРК) с использованием ракет-носителей (РН) на мировом рынке космических услуг. РН могут рассматриваться в виде потенциальных носителей по созданию и выполнению национальных программ, связанных со спутниковыми системами. Важнейшей задачей является обеспечение сохранности и работоспособности космического аппарата (КА) на существующих этапах его вывода в космос, связанных с транспортировкой до стартовой площадки, при подготовке к старту

и при выполнении полета РН. Одной из составных частей проблемы, связанной с вышеперечисленными этапами является создание определенных температурных условий для КА. Во всех случаях сохранность КА должна включать ограждающие элементы, предназначенные для противодействия на него тепловых и газодинамических нагрузок во время выполнения полета. Кроме того, наземные условия поддержания температурного режима в отсеке КА обеспечиваются с помощью системы термостатирования (СТС) воздуха, осуществляющей принудительную вентиляцию в отсеке [2, 3].

Существующий опыт практического использования РН [2, 4, 5] показал, что в связи с требованием создания наиболее оптимальных условий для современных КА возникают задачи по доработкам и модернизации штатных СТС. Все более активное использование РН в рамках коммерческих проектов, их модернизация в части увеличения размеров отсека КА, создание новых РН обуславливают актуальность нового подхода к проблемам модернизации и разработки систем термостатирования воздуха.

Анализ последних исследований и публикаций. Анализ конструктивных особенностей существующих отсеков РН показывает, что эти системы разрабатывались для работы с герметичными аппаратами, когда в отсеке осуществляется только контроль температурно-влажностного режима [2, 4]. Термостатирующий воздух в отсеки РН подается через щелевые газоды, формирующие интенсивные пристенные струи, скорость которых на выходе из щелевых коллекторов достигает 12...16 м/с [3, 5]. Основная масса воздуха движется в пристенных струях мимо РН, затем разворачивается в месте соприкосновения струй и движется вдоль корпуса головного обтекателя к выходным отверстиям на его конической части [4, 5]. Вблизи поверхности РН создаются значительные застойные области, в которых практически отсутствует скорость движения воздуха. В этих условиях коэффициенты конвективной теплоотдачи с поверхности РН имеют значения на уровне естественной конвекции ($3...5 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$), и задача стабилизации температуры РН осуществляется за счет увеличения подачи термостатирующего воздуха в отсек и теплоснимание пристенными струями [6, 7]. В то же время поверхности узлов РН, находящихся в зоне пристенных струй, могут подвергаться значительному газодинамическому влиянию термостатирующего воздуха ($V > 3-4 \text{ м/с}$).

Работоспособность современных негерметичных РН, изготавливаемых из материалов с невысокими механическими характеристиками, в значительной степени будет зависеть от интенсивности воздействия на них окружающей среды в отсеке [2-5]. Поэтому в отсеке должны обеспечиваться определенные условия для РН: низкий уровень теплового и газодинамического воздействия на РН за счет снижения в 1,5...2 раза теплопотока по сравнению с существующими нормами при одновременном ограничении скорости термостатирующего воздуха вблизи поверхности РН до 1,5...2 м/с; должны выполняться повышенные требования к чистоте пространства отсека (например, на уровне федерального стандарта США Fed Std 209E [6]).

При полете РН на активном участке траектории через выходные люки СТС осуществляется сброс избыточного давления воздуха из отсека КА в окружающее пространство (дренирование). При изменении угла атаки или изменении скоростного режима при числах Маха $M \approx 1$ возможна резкая смена избыточного давления на поверхности отсека КА. При отсутствии счетчиков воды на выходных люках СТС возможен вход воздуха из окружающей среды в отсек КА [2-4]. Перед отделением КА от РН до момента сброса головного обтекателя за счет дренирования воздуха должно быть обеспечено выравнивание давления в отсеке с давлением окружающего пространства. В противном случае чрезмерная разница давлений приведет к воздействию существенных газодинамических нагрузок на КА в момент сброса обтекателя.

На основе анализа конструктивных особенностей систем термостатирования РН [5, 7, 8] должны быть сформулированы новые требования к характеристикам данной системы. Ранее требования к СТС определяли технические условия на параметры термостатирующего воздуха – пределы изменения температуры и влажности воздуха, объемный расход воздуха, избыточное давление в отсеке РН в режиме наземного термостатирования и в момент сброса головного обтекателя [2-5, 9, 10]. Новые, современные требования к СТС, состоят в дополнительном нормировании следующих характеристик работы СТС:

- уровень средних коэффициентов теплообмена при охлаждении РН общей системой термостатирования;

- уровень средних скоростей движения термостатирующего воздуха вблизи поверхности РН;
- чистота пространства отсека КА на уровне международных стандартов;
- уровень средних коэффициентов теплообмена и скорости воздуха для устройств локального обдува теплонапряженных узлов РН.

Дополнительные требования к СТС могут быть удовлетворены следующими конструктивными усовершенствованиями существующих СТС [5, 7-9]:

- установкой дополнительных подводящих патрубков, что позволит при необходимости увеличить кратность воздухообмена в отсеке КА;
- установкой счетчиков воды на выходных люках СТС и мембранных фильтров на перегородках между отсеком КА и приборным отсеком РН;
- установкой автономных устройств, предназначенных для локального обдува отдельных элементов РН;
- установкой дополнительных решеток, измененных перфорированных экранов, защитных панелей, которые обеспечат более равномерный обдув РН.

Важным условием запуска РН является обеспечение температурно-влажностного режима в отсеках при проведении предстартовой подготовки перед пуском.

СТС при проектировании требует решений многих задач, направленных на обеспечение требуемых значений чистоты, давления, температуры, расхода и температуры точки росы.

Самым сложным процессом при реализации СТС является осушение воздуха до необходимого значения точки росы (-30°C; -10°C). Поэтому при проектировании СТС основным является выбор способа осушения и способа охлаждения воздуха. При этом воздух выступает рабочим телом, а сам поток воздуха способен снижать или повышать температуру в подоптических пространствах или в «сухих» отсеках РН.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Поскольку к системам термостатирования воздуха РН предъявляются все более высокие нормативные требования, то существующие СТС нуждаются в усовершенствовании, что и предложено в данной работе.

Цель статьи. Целью статьи являются экспериментальные исследования усовершенствованной системы термостатирования воздуха РН.

Изложение основного материала. Усовершенствованная система термостатирования входит в состав передвижного промышленного кондиционера (ППК), который предназначен для подачи термостатирующего воздуха с заданными параметрами в съемное оборудование транспортной системы термостатирования (ТСТ) или адаптер оборудования для определения фактических значений характеристик затрат и негерметичности (ФЗХЗН) дренажных устройств и отсеков РН, или в оборудование системы термостатирования на транспортно-установочном агрегате.

ППК входит в состав ТСТ, что является технологическим оборудованием монтажно-испытательного корпуса (МИК) технического комплекса (ТК) РН, входящей в КРК «Циклон».

ППК состоит из модуля термостатирования, модуля источника питания, системы автоматизированного управления и контроля.

Модуль термостатирования ППК обеспечивает очистку, осушение, охлаждение или нагрев атмосферного воздуха и подает его с заданными параметрами в соответствующее оборудование.

Модуль термостатирования ППК имеет в своем составе: нагнетатель воздуха; холодильную машину; теплообменники; насосное оборудование для транспортировки промежуточного теплоносителя; фильтры; влагоотделитель; нагреватель; трубопроводы; гибкие воздухопроводы.

Модуль источника питания ППК имеет в своем составе: дизель-генератор; батарею запуска дизель-генератора и аварийного освещения; кабель электропитания от системы электроснабжения (СЭС) МВК РН или от СЭП стартового комплекса (СК) с устройством автоматизированного сматывания-разматывания; щит распределительный, что обеспечивает коммутацию потребителей и источников электроэнергии; внутреннюю силовую кабельную сеть ППК.

ППК, установленный на буферной платформе, выполняет в МВК РН и при транспортировке на СК следующие функции:

- подает в течение цикла подготовки РН к пуску в МВК РН (не менее 60 часов) термостатирующий воздух в главный блок с расходом не менее 1300 м³/ч через гибкий воздухопровод и съемное оборудование ТСТ;

- подает термостатирующий воздух с расходом не менее 1300 м³/ч на вход оборудования системы термостатирования, размещенного на транспортно-установочном агрегате, при транспортировке РН на стартовый комплекс и со стартового на технический комплекс при отмене пуска в течение одного часа в одну сторону;

- подает термостатирующий воздух с регулируемым расходом до 1300 м³/ч на вход адаптера оборудования ФЗХЗН, расположенного на монтажном столе, через устройство стыковки ТСТ;

- обеспечивает изменение расхода воздуха, подаваемого от 400 м³/час до 1300 м³/ч с шагом 100 м³/час.

На входах в съемное оборудование ТСТ и в оборудование системы термостатирования на транспортно-установочный агрегат, ППК обеспечивает избыточное давление не менее 10 кПа при расходе подаваемого термостатирующего воздуха 1300 м³/ч и необходимое давление для обеспечения установленных параметров при проведении испытаний по определению ФЗХЗН.

ППК на выходе при работе с любым оборудованием при нормальных условиях должен обеспечивать:

- температуру термостатирующего воздуха в пределах от плюс 12 до плюс 25°С с интервалом установки необходимого значения через 1°С для всех потоков воздуха;

- точность автоматического поддержания заданной температуры воздуха ±2°С при изменении параметров окружающей среды;

- влажность подаваемого воздуха соответствует точке росы не выше плюс 4°С;

- чистоту подаваемого воздуха, соответствующего классу ISO6,7 международного стандарта ISO 14644-1 (класс 5000 стандарта США FED-STD 209E);

- содержание масла в виде паров и аэрозолей на выходе из фильтра – не более 0,1 мг/м³.
Метод контроля – химический анализ по ОСТ 92-1577-78;

- концентрацию хлоридов на выходе из фильтра не более $5,5 \cdot 10^{-5}$ мг/м³.

Точку росы определяли температурой, при охлаждении до которой начинается конденсация воды, содержащейся во влажном воздухе (образование росы), при атмосферном давлении 101325 Па.

При работе ППК в составе ТСТ, обеспечения температуры, влажности и расходы термостатирующего воздуха определяли с помощью соответствующих датчиков.

Схема установки датчиков температуры и скорости воздушного потока в характерных отсеках РН приведена на рис. 1.

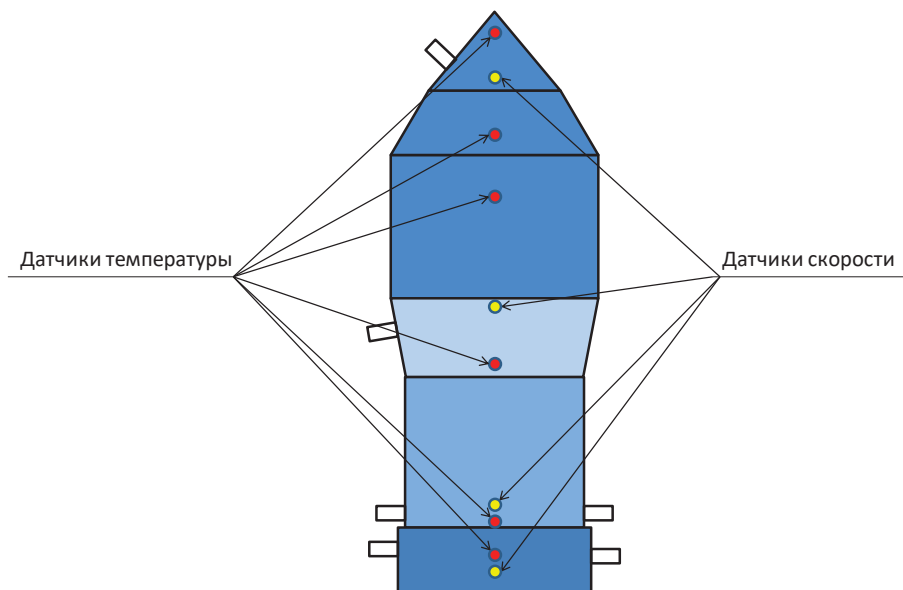
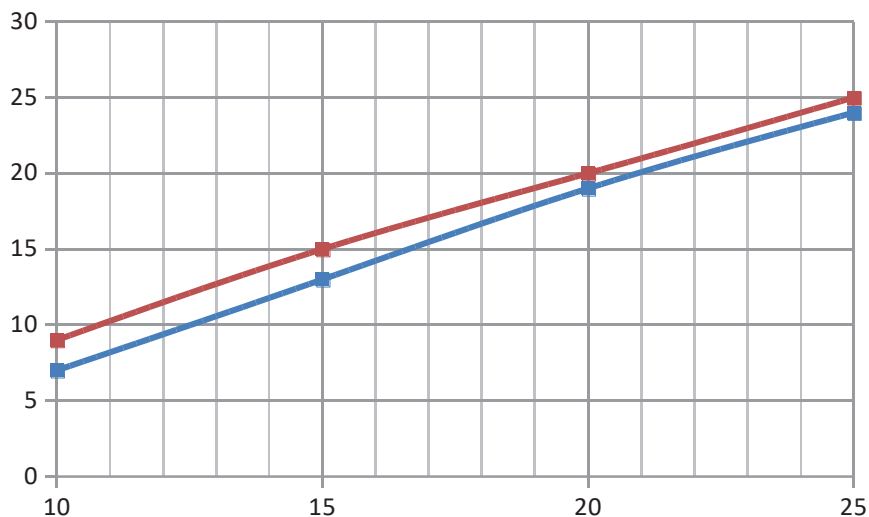


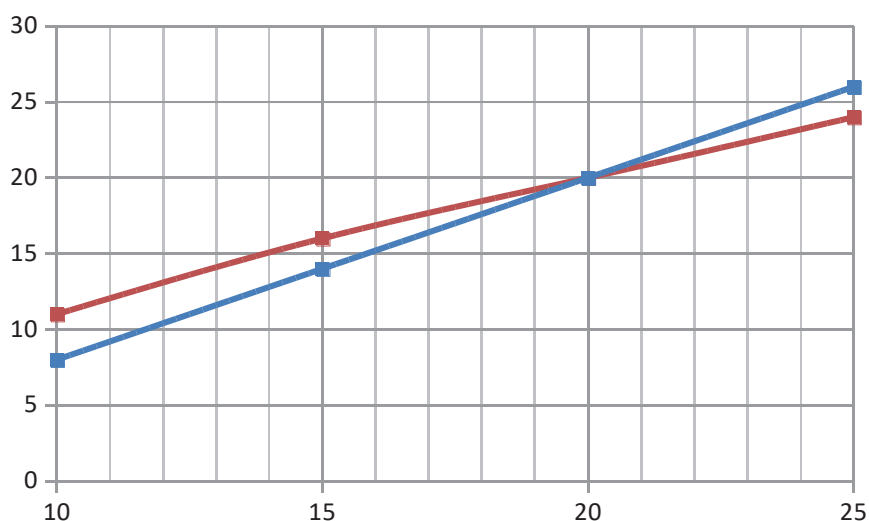
Рис. 1. Схема установки датчиков температуры и скорости воздушного потока в характерных отсеках РН

Далее, приведем некоторые результаты, полученные при среднестатистической обработке значений, полученных с датчиков температуры, установленных в соответствующих отсеках и блоках РН при использовании спроектированной термостатующей системы КПК.

Экспериментальные зависимости температуры на выходе из фильтра модуля предстартовой системы термостатирования КПК и в отсеке приборов РН установленной температуры воздуха термостатирования без учета и с учетом дроссель осушки приведены на рис. 2.



а



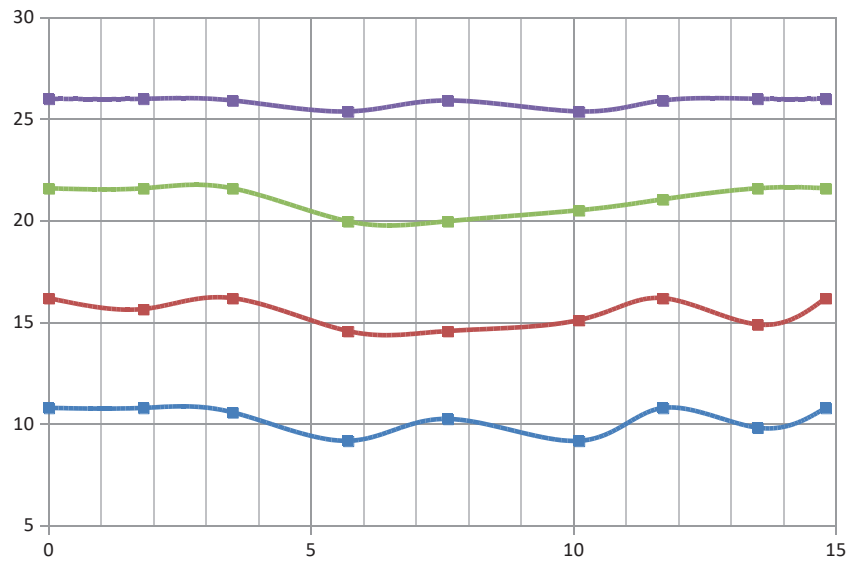
б

Рис. 2. Экспериментальная зависимость температуры на выходе из фильтра модуля предстартовой системы термостатирования (1) и в отсеке приборов (2) установленной температуры воздуха термостатирования РН без учета (а) и с учетом (б) дроссель осушки, длине воздухопровода 30 м и температуре внешней среды 20°C

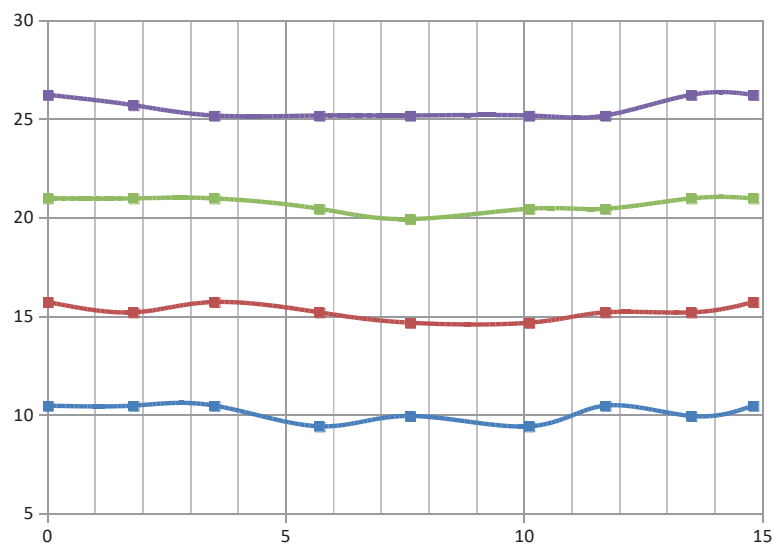
Следует отметить, что также были получены экспериментальные зависимости температуры и для других блоков, которые не имели особых отличий в значениях.

При сравнении результатов с учетом и без учета дроссель осушки (рис. 2) в схеме предстартовой системы термостатирования воздуха РН проявляется незначительная разница в значениях необходимой температуры воздуха, однако, следует отметить о наилучших показателях при учете дроссель осушки.

Результаты экспериментальных исследований градиента температуры по длине оси РН приведены на рис. 3.



а



б

Рис. 3. Экспериментальные результаты градиента температур по длине оси РН без учета (а) и с учетом (б) дроссель осушки, при температуре окружающей среды 20°C и необходимой температуре термостатирования: 1 – 10°C; 2 – 15°C; 3 – 20°C; 4 – 25°C

Из рис. 3 можно сделать вывод о стабильном характере распределения градиента температур по длине оси РН и при температуре окружающей среды в 20°C. Отклонение значений не превышало 10%.

Выводы и предложения. Подытожим вышеприведенные результаты, а также другие результаты, полученные в процессе исследований.

Экспериментальные зависимости температуры на выходе из фильтра модуля предстартовой системы термостатирования КПК и в разных отсеках и блоках РН установленной температуры воздуха термостатирования без и с учетом дроссель осушки и для различных длин воздухопроводов

показали соответствие действующих требований к СТС. При этом установлено, что максимальная разница:

- на выходе из фильтра модуля предстартовой системы термостатирования и в отсеке приборов РН в зависимости от установленной температуры при температуре окружающей среды 20°C составляет 4,0...9%, а при 30°C – 3,8...20,0%. При этом температура воздуха в отсеке приборов РН имеет отклонения 4...10% от установленной величины и составляет 1°C;

- на выходе из фильтра модуля предстартовой системы термостатирования и в разгонном блоке при температуре окружающей среды в 20°C не превышает 7,14%, а при 30°C – 20%. Температура воздуха в разгонном блоке РН имеет отклонения 3...10% от установленной величины и составляет 1°C;

- на выходе из фильтра модуля предстартовой системы термостатирования и в переходном отсеке в зависимости от установленной температуры отличается при температуре окружающей среды 20°C на 4...10%, а при 30°C – до 18%. При этом температура воздуха в переходном отсеке РН имеет отклонения 4,0...9,1% от установленной величины и составляет 1°C;

- на выходе из фильтра модуля предстартовой системы термостатирования и в главном обтекателе в зависимости от установленной температуры отличаются при температуре окружающей среды 20°C на 4,0...27,2%, а при 30°C – на 10...45%. При этом температура воздуха в отсеке головного обтекателя имеет отклонения 4...10% от установленной величины и составляет 1°C.

Приведенные результаты экспериментальных исследований градиента температуры по длине оси РН без и с учетом дроссель осушения и для различных значений температур внешней среды и требований относительно значений температуры воздуха термостатирования показали стабильность характера распределения. При этом отклонения максимальных значений температуры не превышали 10%.

Характеристики спроектированного ППК и усовершенствованной СТС обеспечивают стабильную работу и необходимые показатели качества выполнения основных технических и эксплуатационных характеристик в процессе отработки и применения в условиях космодрома Алкантара.

Список литературы:

1. Галинский В.П., Тимошенко В.И. Проблемы создания научно-методического обеспечения по аэродинамике ракет-носителей. *Космічна наука і технологія*. 1998. № 2/3. С. 64-72.
2. Дегтяренко В. И. Определение параметров воздуха в отсеке ракеты на активном участке полета. *Техническая механика*. 1999. № 1. С. 17-22.
3. Тимошенко В.И., Галинский В.П., Белоцерковец И.С. Проблемы математического моделирования процессов аэрогазодинамики ракет-носителей. *Вісник Дніпропетровського університету. Механіка*. Дніпропетровськ, 1998. Вип. 1. С. 37-52.
4. Timoshenko V.T, Galinsky V.P., Belotserkovets I.S. Problems scientific-methodical aerodynamical of support of development of boost vehicles. Proc. of the 2nd Ankara Intern. Aerospace Conf., Ankara, Turkey, 9-11 Sept., 1998. P. 445-452.
5. Баранов Д.А., Еленев В.Д. Определение массово-энергетических соотношений для параметрического ряда модификаций ракеты-носителя. *Вестн. СГАУ*. 2011. №6. С. 54-63.
6. Основы проектирования летательных аппаратов (транспортные системы): учеб. пособие для студентов вузов / под ред. В.П. Мишина. Москва.: Машиностроение, 2005. 375 с.
7. Сердюк В.К. Проектирование средств выведения космических аппаратов: учеб. пособие для вузов / под. ред. А.А. Медведева. Москва: Машиностроение, 2009. 504 с.
8. Воронин Г.И. Системы кондиционирования воздуха на летательных аппаратах. Москва: Машиностроение, 1973.
9. Маак В., Эккерт Ю. Учебник по холодильной технике; пер. с франц., под ред. Б.В. Сапожникова. Москва : Московский университет, 1998.