

УДК 629.78.048.3 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.67.21

Є.І. Трушляков, С.С. Булавка*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Машинобудівний навчально-науковий інститут, кафедра Кондиціонування і рефрижерації***ОСУШКА ПОВІТРЯ В ПЕРЕДСТАРТОВИХ СИСТЕМАХ ТЕРМОСТАТУВАННЯ ДО НЕОБХІДНОЇ ТОЧКИ РОСИ**

У роботі виконано розгляд, аналіз та можливості осушки повітря в передстартових системах термостатування до необхідної точки роси. У випадку незначного підвищення тиску, з'являється можливість ефективно використовувати фреонові холодильні машини для осушення повітря до точки роси нижче 0°C, замість традиційних фізико-хімічних осушувачів або осушувачів повітря високого тиску в стартових системах термостатування космічних ракетних комплексів.

Ключові слова: осушка повітря, передстартові системи термостатування, точка роси.

Е.И. Трушляков, С.С. Булавка*Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Институт машиностроения, кафедра Кондиционирование и рефрижерации***ОСУШКА ВОЗДУХА В ПРЕДСТАРТОВЫХ СИСТЕМАХ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ ДО НЕОБХОДИМОЙ ТОЧКИ РОСЫ**

В работе выполнено рассмотрение, анализ и возможности осушки воздуха в предстартовых системах термостатирования до необходимой точки росы. В случае незначительного повышения давления, появляется возможность эффективно использовать фреоновые холодильные машины для осушения воздуха до точки росы ниже 0°C, вместо традиционных физико-химических осушителей или осушителей воздуха высокого давления в стартовых системах термостатирования космических ракетных комплексов.

Ключевые слова: осушка воздуха, предстартовые системы термостатирования, точка росы.

Y.I. Trushliakov, S.S. Bulavka*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mechanical Engineering Educational and Scientific Institute, Department of Air Conditioning and Refrigeration***AIR DRYING IN PRE-START THERMOSTATING SYSTEMS TO THE REQUIRED DEW POINT**

It is currently important for the Ukrainian space industry to ensure the competitiveness of rocket and space complexes using launch vehicles in the global space services market. Launch vehicles are considered as potential carriers for the creation and implementation of satellite systems in accordance with national programs of Ukraine and other countries.

An analysis of the design features of the existing spacecraft compartments shows that these systems were designed to work with pressure-tight spacecrafts when only the temperature and humidity is monitored in the compartment. In the work are performed consideration, analysis and possibilities of air drying in pre-start thermostating systems to the required dew point. In the case of a slight increase in pressure, it becomes possible to efficiently use Freon refrigerating machines to dehumidify air to a dew point below 0°C, instead of traditional physic-chemical dehydrators or high-pressure air drying in the starting systems for the thermostating of space rocket systems.

Key words: air drying, pre-start thermostating systems, dew point

Постановка проблеми. У даний час для космічної галузі України актуальним є забезпечення конкурентоспроможності космічних ракетних комплексів (КРК) з використанням ракет-носіїв (РН) на світовому ринку космічних послуг. РН розглядаються як потенційні носії для створення і виконання супутникових систем відповідно до національних програм України та інших держав [1].

Однією з найважливіших завдань є забезпечення збереженості і працездатності космічного апарату (КА) на всіх етапах його виведення в космос: при транспортуванні з монтажно-випробувального комплексу до стартового майданчика, при підготовці до старту і під час польоту РН на активній ділянці траєкторії. Складовою частиною цієї проблеми є створення комфортних температурних умов для КА. У всіх випадках збереження КА забезпечується огорожею від впливу на нього теплових і газодинамічних навантажень за допомогою головного обтічника відсіку КА. Крім того в наземних умовах температурний режим у відсіку КА підтримується за допомогою системи термостатування (СТС), що здійснює примусову вентиляцію в відсіку [2, 3].

Досвід комерційного використання РН [2-5] показав, що в зв'язку з вимогою створення більш комфортних умов для сучасних КА виникали завдання по доопрацюванням і модернізації штатних СТС. Все більш активне використання РН в рамках комерційних проектів, їх

модернізація в частині збільшення розмірів відсіку КА, створення нових РН обумовлюють актуальність нового підходу до проблем модернізації та розробки систем термостатування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз конструктивних особливостей існуючих відсіків КА показує, що ці системи розроблялися для роботи з герметичними апаратами, коли в відсіку здійснюється тільки контроль температурно-вологісного режиму. Термостатне повітря у відсіку КА подається через щілинні газоводи, що формують інтенсивні пристінні струмені, швидкість яких на виході з щілинних колекторів досягає 12...16 м/с. Основна маса повітря рухається в пристінних струменях повз КА, потім розгортається в місці зіткнення струменів і рухається уздовж корпусу головного обтічника до вихідних отворів на його конічній частині [4, 5]. Поблизу поверхонь КА створюються значні застійні області, в яких практично відсутня швидкість руху повітря. У цих умовах коефіцієнти конвективної тепловіддачі з поверхні КА мають значення на рівні природної конвекції ($3...5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$), і завдання стабілізації температури КА здійснюється за рахунок збільшення подачі термостатного повітря в відсік і тепло знімання пристінними струменями [6, 7]. У той же час поверхні вузлів КА, що знаходяться в зоні пристінних струменів, можуть піддаватися значному газодинамічному впливу термостатного повітря ($V > 3-4 \text{ м/с}$).

Працездатність сучасних негерметичних КА, що виготовляються з матеріалів з невисокими механічними характеристиками, в значній мірі буде залежати від інтенсивності впливу на нього навколишнього середовища в відсіку [2-5]. Тому в відсіку повинні забезпечуватися комфортні умови для КА: низький рівень теплового і газодинамічного впливу на КА за рахунок зниження в 1,5...2 рази тепловитрати на КА в порівнянні з існуючими нормами при одночасному обмеженні швидкості термостатного повітря поблизу поверхні КА до 1,5...2 м/с; повинні виконуватися підвищені вимоги до чистоти простору відсіку (наприклад, на рівні федерального стандарту США FedStd 209E [6]).

При польоті РН на активній ділянці траєкторії через вихідні люки СТС здійснюється скидання надлишкового тиску повітря з відсіку КА в навколишній простір (дренування). При зміні кута атаки або зміні швидкісного режиму при числах Маха $M \approx 1$ можлива різка зміна надлишкового тиску на поверхні відділення КА. При відсутності лічильників води на вихідних люках СТС можливо втікання повітря з навколишнього середовища в відсік КА [2-4]. Перед відділенням КА від РН до моменту скидання головного обтічника за рахунок дренирування повітря повинне бути забезпечене вирівнювання тиску в відсіку з тиском навколишнього простору. В іншому випадку надмірна різниця тисків призведе до впливу істотних газодинамічних навантажень на КА в момент скидання обтічника.

На основі аналізу конструктивних особливостей систем термостатування КА [5, 7, 8] повинні бути сформульовані нові вимоги до характеристик даної системи. Раніше вимоги до СТС визначали технічні умови на параметри термостатного повітря – межі зміни температури і вологості повітря, об'ємна витрата повітря, надлишковий тиск у відсіку КА в режимі наземного термостатування і в момент скидання головного обтічника [2-5]. Нові, сучасні вимоги до СТС, складаються в додатковому нормуванні наступних характеристик роботи СТС:

- рівень середніх коефіцієнтів теплообміну при охолодженні КА загальною системою термостатування;
- рівень середніх швидкостей руху термостатного повітря поблизу поверхонь КА;
- чистота простору відсіку КА на рівні міжнародних стандартів;
- рівень середніх коефіцієнтів теплообміну і швидкості повітря для пристроїв локального обдування теплонапружених вузлів КА.

Додаткові вимоги до СТС можуть бути задоволені наступними конструктивними удосконаленнями існуючих СТС [5, 7-9]:

- встановленням додаткових підвідних патрубків, що дозволить при необхідності збільшити кратність повітрообміну в відсіку КА;
- установкою лічильників води на вихідних люках СТС і мембранних фільтрів на перегородках між відсіком КА і приладовим відсіком (ПО);
- установкою автономних пристроїв локального обдування теплонапружених елементів КА;
- установкою ґрат, перфорованих екранів, панелей, що забезпечують більш рівномірний обдув КА.

Важливою умовою запуску РН є забезпечення температурно-вологісного режиму в її відсіках при проведенні передстартової підготовки перед пуском.

СТС під час проектування вимагає рішень багатьох завдань, спрямованих на забезпечення необхідних значень чистоти, тиску, температури, витрати і температури точки роси.

Найскладнішим процесом при реалізації СТС є осушення повітря до необхідного значення точки роси (-30°C ; -10°C). Тому при проектуванні СТС основним є вибір способу осушення та способу охолодження повітря.

При цьому повітря виступає робочим тілом, а сам потік повітря здатний знижувати або підвищувати температуру в підоб'єктивних просторах або в «сухих» відсіках РН.

Виходить, що для термостатування потоку повітря характерні чистота, тиск, температура, витрата і температура точки роси.

Формулювання цілей статті. У роботі необхідно виконати розгляд, аналіз та можливості осушки повітря в передстартових системах термостатування до необхідної точки роси.

Виклад основного матеріалу. Для осушення повітря можуть бути використані такі основні способи [7-10]:

- фізико-хімічні осушувачі;
- хемосорбційні осушувачі;
- осушення повітря конденсацією.

Для осушення повітря шляхом фізико-хімічного поглинання вологи в якості поглиначів застосовуються водні розчини солей і тверді поглиначі. Основним недоліком фізико-хімічних осушувачів є істотне зниження їх працездатності при температурах, що перевищують 30°C . Їх використання в системах обробки повітря доцільно тільки при низькій потрібній температурі точки роси (нижче -10°C), коли відділення вологи конденсацією призводить до швидкого наростання сніжної шуби на теплообмінниках і збільшення потрібної холодопродуктивності.

Використання хемосорбційних осушувачів для вирішення завдань термостатування ускладнено через сильну залежність ступеня осушення від температури і відносної вологості повітря, а також внаслідок складної природи хімічних реакцій, що ускладнює розрахунки.

Осушення повітря можна здійснювати шляхом контакту повітря з охолоджуваною поверхнею, температура якої нижче точки роси. Для відділення утворюваних води або льоду з осушеного повітря в цьому випадку необхідно застосовувати додаткові сепаратори, інакше кінцевий вологовміст повітря може виявитися вище заданого. Процес осушення шляхом конденсації на холодній поверхні в енергетичному співвідношенні є найбільш вигідним для вирішення завдань осушення при температурах точки роси вище 0°C .

Як джерело холоду, необхідного для процесів охолодження і осушення повітря в системах термостатування, застосовують різні типи холодильних машин [9, 10]:

- абсорбційні холодильні машини;
- повітряні холодильні машини;
- осушення і охолодження повітря за допомогою вихрових труб;
- парокомпресійні холодильні машини.

Абсорбційні холодильні машини застосовують в тих випадках, коли в якості основного джерела енергії для отримання холоду доцільно використовувати тепло. Перспективним є застосування абсорбційних холодильних машин в системах централізованого холодопостачання з використанням тепла від ТЕЦ або котельень, які взимку забезпечують системи опалення будівель, а влітку можуть віддавати тепло на отримання холоду. Економічні показники застосування абсорбційних холодильних машин, перш за все, визначаються джерелом подачі тепла, яке використовується для вироблення холоду.

Значною перевагою турбохолодильних машин є їх мала вага і габарити, а також відсутність спеціального холодильного агента, що викликає необхідність застосування теплообмінних апаратів для здійснення процесів тепло- і масопереносу при обробці повітря, що конденсується. Але їх істотним недоліком є підвищена витрата енергії для отримання холоду в порівнянні з іншими типами холодильних машин.

В вихровій трубі реалізований ефект Ранка, що полягає в поділі високошвидкісного потоку на холодний і гарячий. Високі витрати на стиснення повітря, необхідність використання забезпечення більшої витрати повітря, а також складності в реалізації алгоритмів керування роблять використання вихрових труб недоцільним для вирішення завдань термостатування.

Робота парокомпресійної холодильної машини обумовлюється процесами зміни агрегатного стану холодильного агента, що циркулює по контуру машини. Сучасні парокомпресійні машини мають гарну енергетичною ефективністю із ступенем автоматизації, що робить перспективним їх застосування в стартових системах термостатування космічних ракетних комплексів.

Відповідно до [9-11], величина максимально допустимого вмісту вологи вологого повітря визначається як:

$$d_{\max} = 0,622 \frac{P_s}{P_B - P_s},$$

де P_s – тиск насичення водяної пари при поточній температурі вологого повітря;

P_B – тиск вологого повітря.

Відповідно до наведеної залежності, якщо підвищувати тиск повітря при постійній температурі (реалізація відбувається шляхом охолодження стисненого повітря до первісної температури), можна досягти його осушення.

У випадку високого тиску оброблюваного повітря достатньо низькі значення температури точки роси можна отримати на основі охолодження звичайним атмосферним повітрям. На рис. 1 приведемо залежність досяжної температури точки роси від абсолютного тиску осушувача повітря. Температура, до якої охолоджується осушувач повітря прийнята рівною 22°C, яку можна легко отримати, якщо використовувати для охолодження атмосферне повітря.

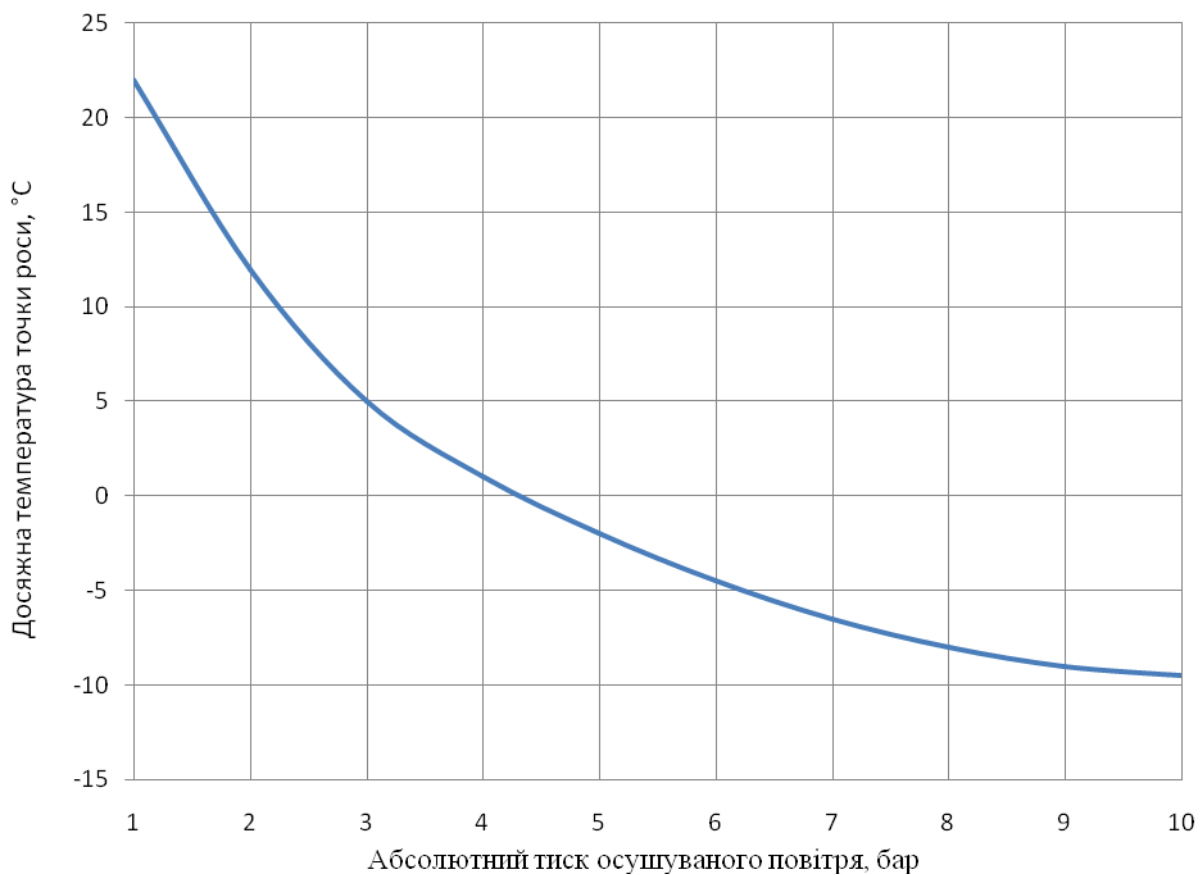


Рис. 1. Залежність досяжної температури точки роси від абсолютного тиску осушувача повітря

З рис. 1 можна бачити, що при тиску повітря, близькому до атмосферного, температура точки роси наближається до температури повітря, що виходить із теплообмінного апарату. Знижувати температуру повітря нижче точки замерзання вологи недоцільно, оскільки це призводить до необхідності періодичного відтаювання, суттєвого ускладнення конструкції і алгоритмів роботи системи термостатування.

На рис. 2 наведені результати експериментальних досліджень процесів осушення повітря для різних тисків, при паспортній ефективності вологовідділювача, рівній 95%, і їх порівняння з розрахунковою мінімальною досяжною температурою точки роси, яка буде мати місце при ефективності відділення вологи 100%.

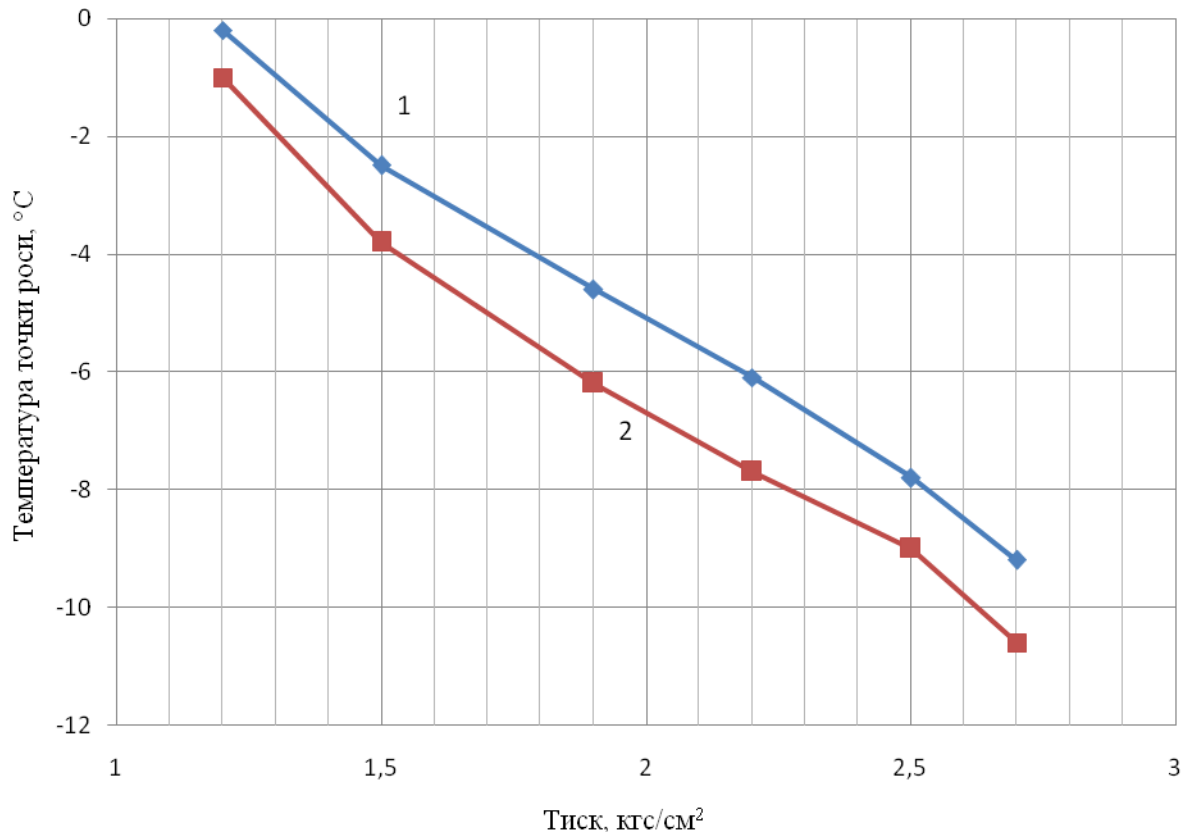


Рис. 2. Експериментальна залежність температури точки роси осушуваного повітря від абсолютного тиску при ефективності відділення вологи: 1 – 95%; 2 – 100 %

На підставі проведених розрахунків і даних експериментів встановлено, що доцільною є установка підпірного дроселя у зв'язку теплообмінник-сепаратор для зниження температури точки роси оброблюваного повітря, при цьому, не знижуючи температуру поверхні теплообміну нижче температури замерзання вологи.

У випадку незначного підвищення тиску, з'являється можливість ефективно використовувати фреонові холодильні машини для осушення повітря до точки роси нижче 0°C, замість традиційних фізико-хімічних осушувачів або осушувачів повітря високого тиску. При цьому, схемне рішення, повинно мати високий ступінь уніфікації, оскільки варіюючи ступенем закриття підпірного дроселя і потужністю нагрівача-довідника, можна легко керувати температурою і вологою повітря, пристосовуючи його параметри до конкретних завдань. Це дозволить ефективно використовувати системи на базі фреонових холодильних машин для термостатування різного корисного навантаження космічного ракетного комплексу.

Висновки. У роботі виконано розгляд, аналіз та можливості осушки повітря в передстартових системах термостатування до необхідної точки роси. У випадку незначного підвищення тиску, з'являється можливість ефективно використовувати фреонові холодильні машини для осушення повітря до точки роси нижче 0°C, замість традиційних фізико-хімічних осушувачів або осушувачів повітря високого тиску в стартових системах термостатування космічних ракетних комплексів.

Список використаних джерел:

1. Державне космічне агентство України. URL:<http://nkau.gov.ua/> (дата звернення: 17.03.2019).
2. 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.
3. Дегтяренко В. И. Определение параметров воздуха в отсеке ракеты на активном участке полета. Техническая механика. 1999. № 1. С. 17-22.
4. Тимошенко В.И., Галинский В.П., Белоцерковец И.С. Проблемы математического моделирования процес сов аэрогазодинамики ракет-носителей. Вісник Дніпропетровського університету. Механіка. 1998. Вип. 1. С. 37-52.
5. Timoshenko V.T, Galinsky V.P., Belotserkovets I.S. Problems scientific-methodical aerodynamical of support of development of boostvehicles. Proc. ofthe 2nd AnkaraIntern. AerospaceConf., Ankara, Turkey, 9-11 Sept., 1998. P. 445-452.
6. Баранов Д.А., Еленев В.Д. Определение массово-энергетических соотношений для параметрического ряда модификаций ракеты-носителя. Вестн. СГАУ. 2011. №6. С. 54-63.
7. Основы проектирования летательных аппаратов (транспортне системы): учеб. пособие для студентов вузов / под ред. В.П. Мишина. М.: Машиностроение, 2005. 375 с.
8. Сердюк В.К. Проектирование средств выведения космических аппаратов: учеб. пособие для вузов / под. ред. А.А. Медведева. Москва: Машиностроение, 2009. 504 с.
9. Воронин Г.И. Системы кондиционирования воздуха на летательных аппаратах. Москва: Машиностроение, 1973. 444 с.
10. Мааке В., Эккерт Ю. Польшманн : Учеб. по холодиль. технике : Основы - комплектующие - расчеты : Монтаж, эксплуатация и техн. Обслуживание холодиль. установок; Пер. с фр. под ред. В. Б. Сапожникова. Москва : Изд-во Моск. ун-та (МГУ), 1998. 1142 с.
11. Горбенко Г.А., Чайка Д.В., Иваненко Н.И. Стартовая система термостатирования космического ракетного комплекса на базе фреоновых холодильных машин. Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. №6. 2008. С. 173-177.

Стаття надійшла до редакції 20.08.2019