

где  $Y_i$  – значения, полученные в результате моделирования,  $\bar{Y}_i$  – аппроксимированные значения. Таким образом, при моделировании молекулярных потоков результаты полученные аналитически (выражение (5) и методом Монте-Карло ( $NQ(x)=10^{12}x^{-3,999}$ ) хорошо согласуются между собой.

### 3. Заключение

При определении распределения концентрации газа в собственной атмосфере КА, возникающей при наличии течи в его корпусе, показано, что концентрация и давление газа зависят в четвёртой степени от расстояния до места течи. Результаты полученные с помощью аналитических расчетов и с помощью моделирования хорошо согласуются. Мониторинг герметичности КА может осуществляться непрерывным анализом показаний вакуумметрических датчиков, расположенных на внешней поверхности КА.

### Литература

1. Андропова Т.П. Опыт разработки и эксплуатации систем контроля давления и герметизации для обитаемых космических аппаратов. НТВ СПбГТУ, 2000, № 4, С. 25-28.
2. Рабинович Б.А., Юревич Е.И. Системы измерения и контроля параметров газовых и жидких сред на космических аппаратах. – СПб., Изд-во Политехн. ун-та, 2014, 132 с.
3. Розанов Л.Н. Манометрический метод определения герметичности крупных объектов // Вакуумная техника и технология. Т. 19, № 3, 2009, С. 179-184.
4. Розанов Л.Н., Скрябнев А.Ю. Течение газа через круглый трубопровод при большом перепаде давления // Вакуумная техника и технология. – Т.20. №1.2010, С. 3-8.
5. Андропова Т., Ксенофонтов В., Малейко Л. и Юревич Е. Опыт разработки и эксплуатации систем контроля давления и герметичности для обитаемых космических аппаратов НТВ СПбГТУ, (2000), 4, с.25-28.
6. Гапонов В.А., Розанов Л.Н., Ратушный Д.В., Дружинин В.Г. Мониторинг герметичности космического аппарата. Робототехника и техническая кибернетика (2016) 1(10).
7. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М, ВШ, 2007, 393стр.

## **Имитация климатических условий поверхности Марса при проведении тепловакуумных испытаний посадочного аппарата в термовакуумной камере**

*А.Ю. Кочетков,*

*г. Химки АО «НПО им. С.А. Лавочкина», kochetkov@laspace.ru*

*В статье рассматривается вопрос об имитации климатических условий поверхности Марса при наземной тепловакуумной отработке посадочного аппарата в универсальной термовакуумной камере.*

*Imitation of the climatic conditions of the Mars surface during the heat vacuum tests of the landing vehicle in the thermal vacuum chamber. A.Yu. Kochetkov. The article discusses the issue of imitating the climatic conditions of Mars during ground-based thermal vacuum testing of a landing vehicle in a universal thermal vacuum chamber.*

Основная задача тепловакуумных испытаний космических аппаратов на этапе наземной экспериментальной отработки является проверка проектных решений. При этом проблема состоит в адекватном воспроизведении натуральных условий эксплуатации. Имеющееся

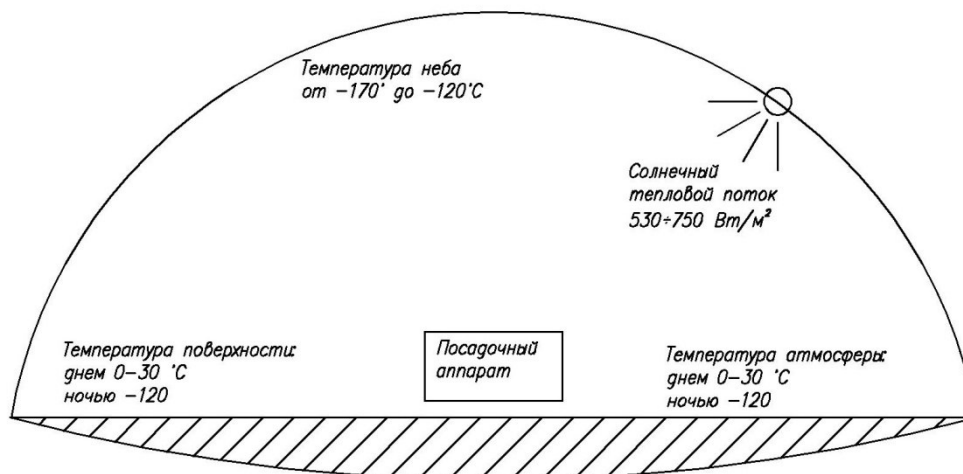
экспериментальное оборудование носит универсальный характер. Существующие термовакуумные камеры или барокамеры способны воспроизводить параметры космического вакуума или атмосферы Земли с различными параметрами. Экспериментальных установок, способных воспроизводить параметры атмосферы Марса в Российской Федерации нет. Постройка специального стенда влечёт за собой большие материальные затраты. В данной ситуации решающее значение играет методика испытаний, отражающая специфику универсального испытательного оборудования и особенности натуральных условий эксплуатации космического аппарата.

Атмосфера Марса имеет сложную структуру и быстроменяющиеся параметры, поэтому при моделировании принимают следующие допущения:

- поток солнечного излучения на орбите изменяется в среднем от 495 до 750 Вт/м<sup>2</sup>;
- продолжительность суток 24,6 часа;
- состав атмосферы 100% CO<sub>2</sub>;
- давление на поверхности от 400 до 1900 Па (от 4 до 19 мбар);
- температура поверхности днём 293 до 303 К;
- температура поверхности ночью от минус 120 до минус 100 °С;
- температура атмосферы днём от 0 до 30 °С;
- температура атмосферы ночью от минус 120 до минус 100 °С .

Атмосфера Марса также характеризуется сильными ветрами до 40 м/с, порывами до 100 м/с и высоким содержанием пыли. Имитация пылевой бури в термовакуумной камере отдельная задача, и она выходит за рамки данной статьи.

На рис. 1 представлена схема внешних условий атмосферы Марса и влияние их на посадочный аппарат.



*Рис. 1. Схема внешних условий атмосферы Марса и влияние их на посадочный аппарат.*

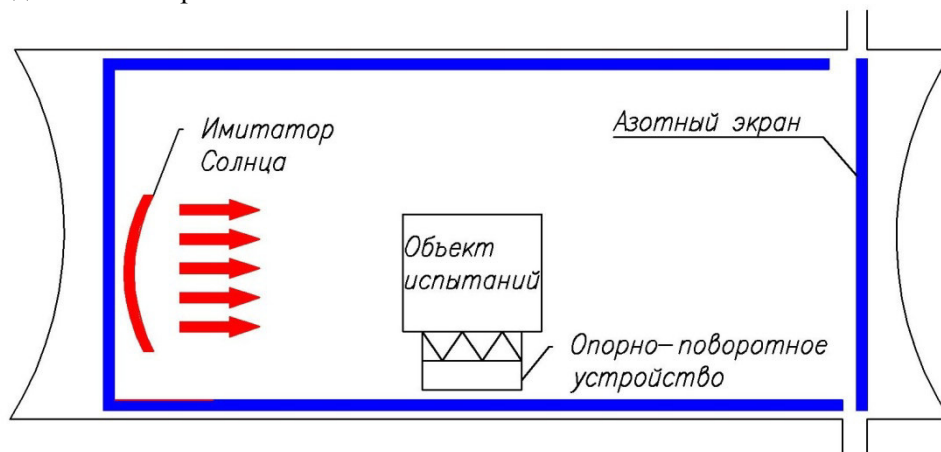
Для имитации климатических условий поверхности Марса необходимо иметь испытательный стенд, способный воспроизводить вышеперечисленные условия. Это должна быть термовакуумная камера, оснащённая системами, обладающими следующими характеристиками:

- криогенными экранами, имеющими температуру минус 120 до 30 °С;
- имитатор Солнца с плотностью теплового потока от 495 до 750 Вт/м<sup>2</sup>;
- инфракрасный излучатель, имитирующий излучение от поверхности планеты;
- рабочий объём термовакуумной камеры должен быть заполнен CO<sub>2</sub> с контролируемым давлением от 400 до 1900 Па.

Как было сказано выше: термовакуумная камера, обладающая вышеперечисленными характеристиками в РФ, отсутствует.

Все имеющиеся термовакуумные камеры спроектированы и используются для имитации «холодного» космического пространства, соответственно оснащённые азотными криогенными экранами и работают при давлении не выше 1,33x10<sup>-3</sup> Па (1x10<sup>-5</sup> мм рт.ст). Средне интегральная температура такого экрана обычно составляет минус 170 °С или 100 К.

Также некоторые части азотного экрана имеют температуру близкую к температуре кипения жидкого азота при атмосферном давлении, т.е. минус 196 °С или 87 К. Схема термовакuumной камеры представлена на рис. 2.



*Рис. 2. Схема термовакuumной камеры.*

Постройка специальной термовакuumной камеры для испытаний единственного экспериментального аппарата неоправданно затратна. Поэтому целесообразно рассмотреть вопрос о проведении тепловакuumных испытаний в имеющейся термовакuumной камере.

При давлении 400 до 1900 Па, которое необходимо создавать в рабочем объёме вакуумной камеры, конвективная составляющая теплообмена вносит существенный вклад в теплообмен между космическим аппаратом и окружающей средой, поэтому пренебречь им нельзя. При имитации атмосферы Марса необходимо воспроизведение газовой среды. Атмосфера Марса имеет следующий состав:

- 95% углекислый газ;
- 2,7% азот;
- 1,6% аргон;
- остальное – примеси: угарный газ, атомарный кислород, неон, криптон, ксенон, пары воды.

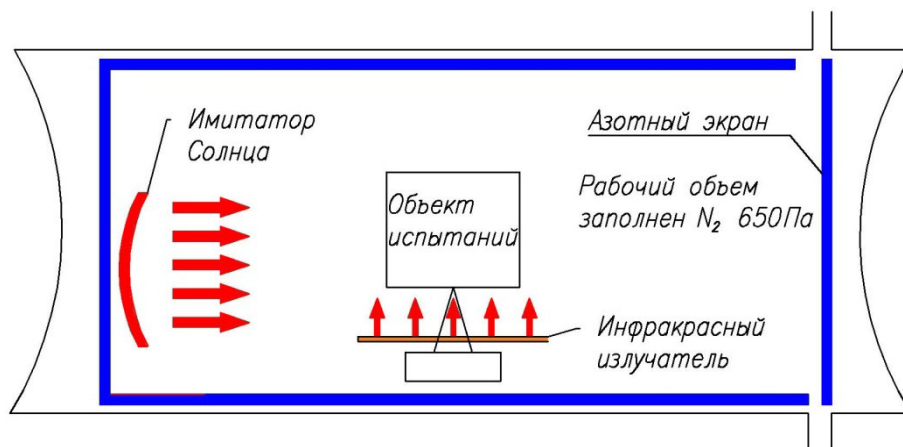
В [1] даны термодинамические свойства углекислого газа. Температура сублимации при давлении 100 Па составляет около минус 130 °С.

При проведении тепловакuumных испытаний в имеющейся сегодня универсальной термовакuumной камере необходимо создавать давление углекислого газа от 400 до 1900 Па. При этом температура криогенных экранов должна поддерживаться на уровне минус 120 °С до минус 80 °С. Азотные экраны имеют температуру от минус 170 до минус 196 °С. Конструкция имеющихся азотных экранов не позволяет устанавливать заданную температуру в диапазоне от минус 120 до минус 80 °С. Углекислый газ, поступающий в вакуумную камеру, будет конденсироваться на стенках азотных экранов, при этом давление в рабочем объёме будет существенно ниже требуемого. Необходима замена углекислого газа на более подходящий. Выбранный газ должен иметь хорошо изученные термодинамические свойства, быть не токсичным, недорогим, а также не должен иметь химического взаимодействия с внутрикамерным оборудованием.

Наиболее подходящие по своим термодинамическим и другим характеристикам следующие газы: кислород, аргон, азот. Из перечисленных газов наиболее химически активным является кислород. Его использование нежелательно, так как он может химически взаимодействовать с внутрикамерным оборудованием. Аргон дороже азота. Таким образом больше всего подходит азот.

Методика тепловакuumных испытаний должна быть следующая. Термовакuumная камера должна откачиваться до давления  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па ( $1 \cdot 10^{-5}$  мм рт.ст.) для удаления из рабочего объёма атмосферных газов. Далее в азотные экраны подаётся жидкий азот и одновременно включаются бортовые тепловые нагрузки и инфракрасные нагреватели, имитирующие внешние тепловые нагрузки. После получения стационарного режима при

высоком вакууме вакуумные насосы отсекаются от рабочего объёма, и в объём термовакуумной камеры напускается чистый азот до необходимого давления. Далее ведутся испытательные режимы при заданном давлении. Давление в рабочем объёме термовакуумной камеры регулируется подачей газа и включением вакуумных насосов. Схема такой установки представлена на рис. 3.



*Рис. 3. Схема термовакуумной камеры с инфракрасным излучателем.*

Представленная методика позволяет проводить испытания посадочного аппарата или его теплового макета при наземной экспериментальной отработке в условиях атмосферы Марса в "обычной" термовакуумной камере. Моделирование внешних тепловых потоков при помощи азотных экранов и инфракрасных излучателей позволяет наиболее полно воспроизвести натурные условия без существенной доработки экспериментального оборудования. Единственным недостатком представленного метода является замена состава атмосферы Марса на газообразный азот. С другой стороны, термодинамические параметры основной составляющей атмосферы Марса - углекислого газа и азота хорошо изучены и перерасчёт результатов эксперимента проведённого на азоте может быть пересчитан на углекислый газ.

#### Литература

1. РД 92-0215-88.
2. Н.Б.Варгафтик. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей, М., 1972г. 720 стр. с илл.