



МОДЕЛИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОГО ВАКУУМА ПРИ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ОБЪЕКТОВ НАНОИНЖЕНЕРИИ

*В.Коваль, К.Моисеев, В.Папко, к.т.н., С.Розанов /
info@intech-group.ru*

Космический вакуум (КВ) – среда, плотность которой по мере удаления от Земли уменьшается. На расстоянии 100–20000 км она изменяется от 10^{14} до 10^2 частиц в кубическом сантиметре. В межгалактическом пространстве плотность снижается до одной частицы. Особенность космического пространства (КП) – неограниченное поглощение газов и паров, выделяющихся с космического аппарата (КА), что сравнимо с вакуумным насосом с бесконечной скоростью откачки. Солнечные батареи и фрикционные узлы КА должны надежно функционировать в открытом КП. Это вызывает необходимость экспериментальной проверки их работоспособности в КВ. ЗАО "Интек Аналитика" совместно с компанией HSR AG (Лихтенштейн) являются разработчиками и поставщиками комплексов для имитации КП в лабораторных условиях.

Основная особенность поведения материала в КВ связана с массопотерями, приводящими к изменению поверхностных свойств, сопровождаемому изменением его оптических характеристик. Кроме того, потеря смазки в узлах трения приводит к увеличению адгезионной связи между трущимися поверхностями, их интенсивному износу и заклиниванию [1, 2].

Изменение поверхностных свойств солнечных батарей и покрытий терморегулирующих элементов нарушает энергетический баланс. Поскольку теплоотвод в вакууме осуществляется только за счет излучения, следует ожидать повышения рабочей температуры КА, что приведет к росту сублимации из поверхностных слоев его элементов.

При создании солнечных батарей (рис.1) и антифрикционных покрытий в узлах трения используются тонкопленочные нанотехнологии. Применительно к сублимации материала в КВ традиционные формулы вакуумной техники не дают надежных результатов. Задача осложняется при определении интенсивности испарения компонентов сплава. Если в состав тонкопленочного фотоэлемента

MODELING OF THE VACUUM OF SPACE IN THE GROUND TESTS OF NANOENGINEERING OBJECTS

*V.Koval, K.Moiseyev, V.Papko, PhD, S.Rozanov /
info@intech-group.ru*

Vacuum of space (VS) is a environment, the density of which is lessening with moving away from the Earth. At 100 – 20000 km from the Earth this density varies from 10^{14} up to 10^2 particles per cm^3 . In the intergalactic space the density goes down to one particle. The pivotal feature of the outer space is an unlimited absorption of gases emitting from a space vehicle (SV), which is comparable with a vacuum pump with an infinite speed of pumpdown. Batteries, friction units and other SV elements must function reliably in the open outer space– OS. This calls for a necessity of an experimental testing of their operability in VS. Intech Analytics Co. jointly with HSR AG (Liechtenstein) are the developers and suppliers of complexes for imitation of the OS in laboratory conditions, which is the topic of the presented material.

The basic feature of the materials' behavior in VS is a mass loss, leading to changes of their surface properties, which are accompanied with alteration of the optical characteristics. Loss of lubrication in friction units results in strengthening of the adhesive bonds between the rubbing surfaces and their more intensive deterioration and jamming [1, 2].

Alteration of the surface properties of the solar batteries and coatings of the thermoregulating elements breaks the energy balance. Since a heat sink in vacuum is carried out only due to radiation, the working temperature of SV is expected to rise, which will lead to a growing sublimation of its elements from the surface layers.

For creation of the solar battery elements (Fig.1) and antifricition coatings for the friction units thin-film nanotechnologies are used. As far as the sublimation of material in VS is concerned, the traditional formulas of vacuum technologies do not bring reliable results. The task becomes even more complicated, when the intensity of the alloy components' evaporation has to be determined.

If the composition of a thin-film photocell of a solar battery includes zinc, the speed of evaporation of which in vacuum at 300°C exceeds $2 \cdot 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$ [3], then the speed



солнечной батареи входит цинк, скорость испарения которого в вакууме при 300°C превышает $2 \cdot 10^{-5}$ г/см²с [3], то его удаление из сплава пленки фотоэлемента Cu_2ZnSn_4 значительно меньше и должно определяться экспериментально.

Оценка долговечности узлов трения в атмосферных условиях также не позволяет определить их работоспособность в вакууме. Например, если коэффициент трения стали по стали на воздухе 0,5, то в высоком вакууме после прогрева он возрастает до 2,9 [4]. Все это вызывает необходимость проверки работоспособности элементов КА в условиях, имитирующих КВ либо моделирующих процессы, протекающие в КВ.

Моделирование проводится в лабораториях в специальных вакуумных камерах. При воспроизведении в них давления, соответствующего реально действующему на КА, следует учитывать статическое и динамическое давление. Давление на различные элементы КА зависит от их ориентации относительно его вектора движения. Учитывая, что в космосе скорости объекта и газовых частиц соизмеримы, давление на переднюю часть объекта может в десятки раз превосходить статическое, а на заднюю часть быть на несколько порядков ниже.

При имитации КВ осуществляется тождественное воспроизведение космических условий, а при моделировании – масштабное, когда определяется и воспроизводится одинаковая реакция объекта в КВ и в установке.

Например, чтобы смоделировать теплообмен между поверхностью КА и космосом, достаточно понизить давление до величины менее 10^{-2} Па, при котором теплоотвод за счет конвективности и теплопроводности газа практически отсутствует. Для имитации теплопередачи от объекта с температурой выше 300 К в открытое космическое пространство достаточно иметь криопанели вакуумной камеры при температуре жидкого азота (77 К) с коэффициентом черноты $\leq 0,95$.

Для моделирования сублимации материала необходимы условия, при которых вероятность возвращения молекулы на поверхность испарения практически равна нулю. Это учитывается коэффициентом возврата R, который в космосе практически равен нулю.

При уходе молекул с поверхности КА вероятность их единичных возвращений обуславливается взаимными столкновениями молекул вблизи поверхности либо отражением от выступающих элементов объекта (рис.2а).

Откачка молекул в вакуумной камере с внешней откачкой (турбомолекулярный или диффузионный насосы) (рис.2б) сопровождается их многократным

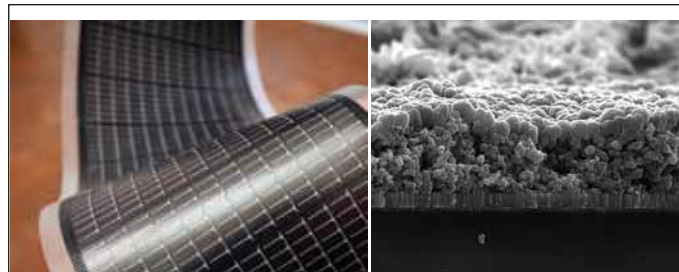


Рис.1. Тонкопленочный фотоэлемент на базе Cu_2ZnSn_4
Fig.1. A thin-film photocell on the basis of Cu_2ZnSn_4

of its removal from Cu_2ZnSn_4 alloy of the photocell film is considerably less and should be determined experimentally.

Estimation of durability of the friction units in the atmospheric conditions also does not allow to determine their working capacity in vacuum. For example, if the friction coefficient of steel on steel in the air is 0.5, in high vacuum it increases up to 2.9 [4]. All this calls for necessity to check the elements of SV in the conditions either simulating the VS parameters, or modeling the processes.

Modeling is carried out in laboratories, in special vacuum chambers. When the pressure, corresponding to the level really effecting SV, is reproduced in them, it is necessary to take into account the static and dynamic pressures. Pressure upon various elements of SV depends on their orientation relative to its vector of movement.

Considering the fact, that in outer space the speeds of an object and of gas particles are commensurable, the pressure on the front part of the object may be dozens of times higher, than the static pressure, while the pressure on the object's rear part could be incomparably lower.

Imitation of VS means an identical reproduction of the space conditions, while modeling means a scaled one, when the same results of an object's reactions in VS and in an installation are determined and reproduced.

For example, in order to simulate a heat exchange between the surface of SV and the outer space it is enough to make pressure lower, than 10^{-2} Pa, in the conditions of which a heat sink practically does not exist due to convection and heat conductivity of gas.

In order to imitate a heat transfer from an object with a temperature above 300 K into the open outer space it is enough to have vacuum chamber cryopanels at the temperature of a liquid nitrogen (77K) and with emissivity factor ≤ 0.95 .

For modeling of a sublimation of a material it is necessary to ensure conditions, in which the probability of a molecule's return to the evaporation surface is practically equal to zero. This is taken into account by the reset coefficient R, which in the outer space is practically equal to zero.

When molecules leave the SV surface, the probability of a return of individual molecules is determined either by their

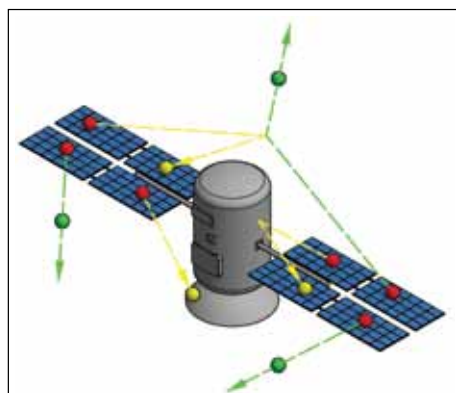


Рис.2а. Условия ухода газа с КА в космическом пространстве
Fig.2a. Conditions, in which gas leaves SV in the outer space



Рис.2б. Удаление испарившегося с КА газа в камере с внешней откачкой
Fig.2b. Removal of the gas, evaporated from SV, in the chamber with an external pumpdown

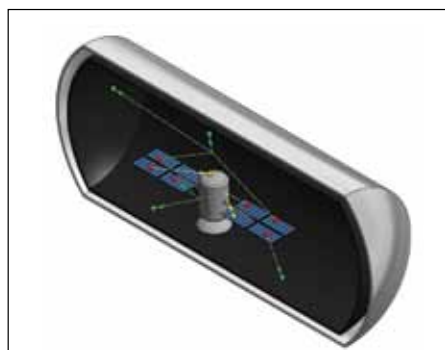


Рис.2в. Условия удаления испарившегося с КА газа в камере с внутренней откачкой
Fig.2c. Conditions for removal of the gas evaporated from SV in the chamber with an internal pumpdown

возвращением на поверхность испарения, прежде чем они будут удалены из камеры. В первом приближении коэффициент возврата молекул прямо пропорционален отношению площади отверстия, через которое осуществляется откачка к общей площади камеры, отношению потока молекул на ее стенки к потоку откачки, площади испарения к площади камеры.

Внутренняя откачка камеры (рис.2в) реализуется при размещении откачивающих панелей криогенного насоса на внутренних стенках камеры. Если отношение площадей поверхности стенок камеры и насоса близко к единице, коэффициент возврата молекул может быть существенно снижен.

В камере с внешней откачкой величина R может достигать 10, то есть каждая молекула, прежде чем будет откачана, вернется на поверхность испарения 10 раз. При одинаковых соотношениях размеров объекта и камер с различными способами откачки, в камере с внутренней откачкой R может составлять $2,5 \cdot 10^{-2}$ [1]. В такой камере условия приближаются к космическим. Учитывая, что откачка газов, как правило, носит избирательный характер, коэффициенты возврата для различных газов также различаются.

В зависимости от ориентации манометрического преобразователя относительно объекта и откачивающей поверхности фиксируются различные давления. Например, манометрические преобразователи, электродные части которых направлены в противоположные стороны (одна на объект, другая на откачивающие панели криогенного насоса), могут показывать давления, отличающиеся в десятки раз. Исходя из этого, $R \approx P_1/P_2$, где P_1 и P_2 – давления, создаваемые потоком молекул газа, летящих к объекту и от объекта, соответственно.

Для моделирования работы узла трения в КВ нет необходимости создавать предельно низкие давления

mutual collisions near the surface, or by their repulsion from the protruding elements of the object (Fig.2a).

Pumpdown of molecules in a vacuum chamber with an external pumpdown (turbo-molecular or diffusion pumps) (Fig.2b) is accompanied by their multiple return to the evaporation surface, before they are removed from the chamber.

In a first approximation, the returning ratio of the molecules is directly proportional to the relation of the area of the aperture, through which pumping out is carried out, to the chamber's total area, the relation of a flow of the molecules on its walls to the flow of a pumpdown, the relation of the evaporation area to the chamber area.

Internal pumpdown of a chamber (Fig.2c) is realized by placement of the pumping out panels of the cryogenic pump on the internal walls of the chamber. If the ratio of the areas of the chamber walls and of the pump is close to a unity, the returning ratio of the molecules can be essentially lowered.

In the chamber with an external pumpdown R can reach the value of 10, which means that each molecule, before it is pumped out, will 10 times return on the surface of evaporation. With identical ratios of the sizes of the object and of the chambers with various ways of a pumpdown, in the chamber with an internal pumpdown R can be equal to $2.5 \cdot 10^{-2}$ [1].

In such a chamber the test conditions are close to the space conditions. Taking into account the fact that, as a rule, a pumpdown of gases has a selective character, the returning ratios for various gases can also be different.

Depending on the orientation of a gage head in relation to the object and pumping out surface, various pressures are registered.

For example, the gage heads, the electrode parts of which are directed to the opposite sides (one to an object, another – to the pumping out panels of a cryogenic pump), can show pressures with tenfold differences. Proceeding from this,



[2]. Достаточно воспроизвести условия, при которых разрушенные защитные пленки на фрикционных поверхностях (оксидные, газовые и другие) не успевают восстанавливаться разряженной средой. Кроме того, поскольку подшипниковый узел имеет ограниченную связь с окружающей средой, в нем создается микроклимат, который с определенного значения окружающего давления не будет уменьшаться. Показано, что при скоростях вращения шарикоподшипников выше 5000 об/мин давление ниже 10^{-4} Па не приводит к увеличению момента сопротивления вращению и уменьшению ресурса работы.

Исходя из требований к моделированию КВ, целесообразно создавать имитаторы космического пространства с использованием внутренней откачки (см. рис.2в) путем размещения откачивающих криопанелей по всей внутренней поверхности камеры. Существуют несколько способов охлаждения криопанелей до 20 К и ниже. Один из перспективных – использование криорефрижераторов для охлаждения криопанелей, размещаемых по всей поверхности камеры (рис.3).

Откачивающая панель представляет собой трехслойную структуру. Наружный сплошной экран с температурой около 70К перекрывает теплоприток от стенок камеры на откачивающую панель, охлажденную до 20К.

На поверхность откачивающей панели нанесен сорбент для сорбции неконденсируемых газов. Внутренний экран, охлаждаемый до 70К, выполнен в виде жалюзи с коэффициентом черноты $\leq 0,95$ и предназначен для защиты откачивающей криопанели от тепла, выделяемого объектом, имитации радиационного теплоотвода с объекта в КП, а также для откачки конденсируемых паров и газов. Такие имитаторы КВ, оснащенные криопанелями, проектируются еще на этапе создания вакуумной камеры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нусинов М.Д. Воздействие и моделирование космического вакуума. – Москва: Машиностроение, 1982, с. 175.
2. Папко В.М. Влияние вакуума на работоспособность подшипников качения. – Труды Всесоюзного научно-исследовательского конструкторско-технологического института подшипниковой промышленности, 1973, № 4, с.76.
3. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. – Москва: Издательство Мир, 1964. с. 608 – 642.
4. Деулин Е.А., Медников М.И., Папко В.М. Расчет, конструирование и особенности эксплуатации механизмов для работы в вакууме. – Москва: Машиностроение, 1986, с.79.

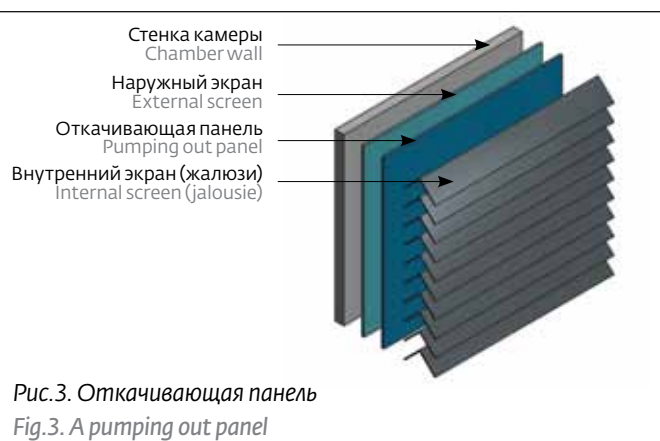


Рис.3. Откачивающая панель
Fig.3. A pumping out panel

$R \approx P_1/P_2$, where P_1 and P_2 are the pressures created by the flows of the gas molecules, flying, accordingly, to an object and from it.

For modeling of operation of a friction unit in VS there is no necessity to create an extremely low pressure [2]. It is enough to reproduce the conditions, in which the destroyed protective films on the friction surfaces (oxide, gas, etc.) have no time to be restored by the evacuated environment.

Besides, since a bearing unit has limited bonds with the environment, a certain microclimate is created inside of it, which will not lessen from a certain level of the surrounding pressure.

It was experimentally demonstrated, that at speeds of rotation over 5000 rounds/min. a pressure below 10^{-4} Pa does not increase the moment of resistance to rotation and does not reduce the service life.

Proceeding from the requirements to VS modeling in laboratory conditions, it would be expedient to develop space simulators with the use of an internal pumpdown (Fig.2c) by placing the pumping out cryopanel on all the internal surface of the chamber.

There are several ways of cooling the cryopanel up to 20 K and below. One of the perspective ways is the use of cryorefrigerators for cooling of the cryopanel placed on all the surface of the chamber (Fig.3).

A pumping out panel is a three-layer structure. Its external continuous screen with a temperature about 70K blocks the heat leakage from the chamber walls to the pumping out panel cooled up to 20K.

A sorbent is put on the surface of the pumping out panel for sorption of the noncondensable gases. The internal screen cooled up to 70K is made in the form of a jalousie with the emissivity factor ≤ 0.95 and is intended for protection of the pumping out cryopanel from the heat emitted by an object, imitation of a radiation heat sink from the object in the outer space, and also for pumping out of the condensable vapors and gases. Such vacuum space simulators equipped with cryopanel are designed already at the stage of development of a vacuum chamber.