



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО
ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ИМ. АКАДЕМИКА С.И. ВАВИЛОВА

М.Д.НУСИНОВ

ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОГО ВАКУУМА
НА МАТЕРИАЛЫ И УСТРОЙСТВА
НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ

ЗАОЧНЫЙ
ИНСТИТУТ
ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ
ИТР

Редакционно-методический совет

В.П.Борисов, В.В.Голоскоков, Н.И.Гореликов, В.С.Коган, В.В.Леонов, А.К.Ребров, Л.Н.Розанов, В.Я.Плисковский, Л.Г.Садиков (ответственный за выпуск), Г.Л.Саксаганский (председатель, рецензент), А.Б.Цейтлин.

Нусинов М.Д. Влияние космического вакуума на материалы и устройства научной аппаратуры. – М.: Машиностроение, 1987, 48 с.

В брошюре рассмотрены вакуумно-физические факторы космического пространства и влияние космического вакуума на работоспособность и эксплуатационные характеристики материалов, узлов и блоков научной аппаратуры космических летательных аппаратов. Затронуты вопросы массопотерь, адгезии и трения, электрофизических явлений, изменения механических, теплофизических и оптических свойств. Перечислены возможности технологического использования космического вакуума; изложены критерии и методика моделирования его воздействий на материалы и приборы в наземных экспериментальных установках.

Библиогр.: 7 назв. Ил. 16. Табл. 7.

Выпущено по заказу Заочного института повышения квалификации ИТР Центрального правления НТО приборостроительной промышленности им. академика С.И.Вавилова.

© Заочный институт повышения квалификации ИТР Центрального правления НТО приборостроительной промышленности им. академика С.И.Вавилова, 1987 г.

ВВЕДЕНИЕ

Космический вакуум (КВ) — разреженная космическая газообразная материя — одно из интереснейших природных явлений. КВ оказывает разнообразные воздействия на материалы, узлы и блоки бортовых научных приборов (БНП), находящихся вне гермоотсеков космических летательных аппаратов (КА). Так как эти приборы представляют собой очень сложные оптико-механические, электрические и электронные устройства, даже знание детальных вакуумных характеристик их составных частей не позволяет на современном этапе аналитически оценить и заранее предсказать те или иные особенности их поведения в космическом полете. Однако все БНП должны иметь высокую степень надежности при эксплуатации, так как в большинстве случаев от них зависит успех всего космического полета. Поэтому единственным приемлемым на сегодняшний день способом их подготовки к полетам являются тщательные предполетные исследования и испытания в специальных наземных установках, моделирующих воздействия КВ. В то же время и при таком подходе нелегко осуществить моделирование, учитывая многообразие процессов и явлений, а также разнообразие типов и устройств БНП. Необходим научно-методический подход к выбору параметров лабораторных установок.

Приведенная методика лабораторного моделирования воздействий КВ, проиллюстрированная несколькими примерами из практики, должна способствовать научно-обоснованному подходу к подбору параметров такого моделирования. Основу этой методики составляет отыскание для каждого процесса или явления такого давления (или области давлений), около которого параметры процесса или явления стабилизируются.

1. КОСМИЧЕСКИЙ ВАКУУМ

1.1. МЕЖЗВЕЗДНЫЕ И МЕЖПЛАНЕТНЫЕ ПРОСТРАНСТВА

Средняя концентрация газа (в основном, атомарного водорода) в межзвездных областях равна $\sim 10^6 \text{ м}^{-3}$, а его температура близка к 10^2 К . Основной источник вещества в межпланетном космическом пространстве — Солнце.

Солнце состоит в основном из водорода ($\sim 90\%$) и гелия ($\sim 9\%$). Газовые частицы покидают солнечную корону со скоростями от 300 до $800 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$, образуя стационарные потоки плазмы "солнечный ветер". Концентрация ионизированных атомов водорода и гелия в солнечном ветре вблизи Земли около $5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$, их средняя температура $2 \cdot 10^5 \text{ К}$.

Физические условия в межпланетном пространстве широко варьируются в зависимости от солнечной активности. В период ее максимума после появления на Солнце хромосферных вспышек средние скорости частиц могут возрастать до $\sim 10^3 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$, а их концентрации — до $\sim 10^8 \text{ м}^{-3}$.

В результате взаимодействия частиц ("солнечный ветер") с геомагнитным полем на удалениях от поверхности Земли, равных примерно десяти земным радиусам, возникает ударная волна. Отчетливо различаются фронт волны, магнитопауза и расположенная между ними область турбулентного движения плазмы.

1.2. АТМОСФЕРЫ ПЛАНЕТ И ЛУНЫ

А т м о с ф е р а З е м л и и в особенности ее внешняя часть — экзосфера, находятся в непрерывном движении и изменении, основная причина которых — солнечная активность. Наблюдаются 11-летние, 27-дневные, суточные, сезонные, широтные и другие вариации температур, концентраций частиц и других характеристик земной атмосферы. На высотах 100... 150 км длина среднего свободного пробега атмосферных частиц становится равной нескольким десяткам метров, т.е. соизмеримой с характеристическими линейными размерами космического аппарата (КА).

Как видно из табл. 1, атмосфера Земли неоднородна как по химическому составу, так и по состоянию частиц (молекулы, атомы или ионы). На высотах до $\sim 60 \text{ км}$ в атмосфере присутствуют только нейтральные молекулы. На больших высотах начинается диссоциация молекул и возрастает концентрация электронов и ионов. На высоте свыше нескольких тысяч километров газовые частицы полностью ионизированы.

А т м о с ф е р а Л у н ы из-за малой по сравнению с Землей массы Луны сильно разрежена. Давление газа у лунной поверхности $\sim 10^{-10} \text{ Па}$ ночью и $\sim 10^{-8} \text{ Па}$ днем; концентрация газа в ночное время близка к $2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Основные компоненты атмосферы — Ne, Ar; H_2 и He. Измерен-

Основные характеристики земной атмосферы на различных высотах в условиях средней солнечной активности

Высота, км	Давление, Па	Температура, К	Средний молекулярный вес, а.е.м.	Концентрация нейтральных частиц, м ⁻³			Состав газа
				суммарная	молекулярных	атомарных	
Уровень моря	$\sim 10^5$	300	29	$2,7 \cdot 10^{25}$			$78\% \text{N}_2$; $21\% \text{O}_2$; $\sim 1\% \text{Ar}$; $2,5 \cdot 10^{-3}\% \text{H}_2$; He, Ne, Kr
30	$\sim 10^4$	243	29	$4 \cdot 10^{23}$			N_2 ; O_2 (O_3); Ar N_2 ; O_2 ; O_3 N_2 ; O_2 ; O N_2 ; O_2 ; O
50	70	270	29				
100	$3 \cdot 10^{-2}$	200	29				
150	$5 \cdot 10^{-4}$	800	25	$2 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{16}$	$1,3 \cdot 10^{13}$	N_2 ; O_2 ; Ar; He; H
200	$3 \cdot 10^{-4}$	1200	21	$2 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{15}$	$2,2 \cdot 10^{12}$	O_2 ; N_2 ; O_2 ; He; Ar; H
300	$3 \cdot 10^{-5}$	1300	17	$7,6 \cdot 10^{13}$	$5,1 \cdot 10^{12}$	$\sim 10^{12}$	O ; N_2 ; He; O_2 ; H
500	$9 \cdot 10^{-7}$	1300	14	$3,5 \cdot 10^{13}$	$\sim 10^{10}$	$3,5 \cdot 10^{12}$	O ; He; H; Ne; O_3
800	$7 \cdot 10^{-8}$	1300	9	$2,5 \cdot 10^{11}$	$\sim 10^8$	$2,5 \cdot 10^{11}$	O ; He; H; N_2 ; O_2 He; H; O
1000	$\sim 10^{-8}$	1300	3	$2,1 \cdot 10^{11}$		$2,1 \cdot 10^{11}$	
2000	$\sim 10^{-9}$	1300	2	$3 \cdot 10^9$		$3 \cdot 10^9$	H; He
5000	$\sim 10^{-10}$	10^3	2	$\sim 10^9$		$\sim 10^9$	H; He
10000	$\sim 10^{-11}$	10^3	2	$\sim 10^8$		$\sim 10^8$	H; He
20000	$\sim 10^{-12}$	10^3	2	$\sim 10^8$		$\sim 10^8$	H; He

ная концентрация Не согласуется с модельными представлениями о солнечном ветре, как об источнике атомов гелия. Концентрация Не также близка к расчетным величинам. Измеренная концентрация H_2 примерно в три раза больше ожидавшейся.

А т м о с ф е р ы М е р к у р и я, М а р с а, В е н е р ы. Меркурий подобно Луне имеет сильно разреженную атмосферу: давления у его поверхности $8 \cdot 10^{-8}$ Па. Основные составные части атмосферы — Не, Аг и Хе.

Марс имеет слабо разреженную атмосферу; давление у его поверхности $\sim 10^2$ Па. Состав атмосферы: $CO_2 \sim 95\%$; $N_2 \sim 2,5\%$; $Ar \sim 1,5\%$; следы H_2O , O_2 . На больших высотах в результате фотодиссоциации молекулы CO_2 распадаются на CO и O .

Давление газа у поверхности Венеры достигает ~ 10 МПа (100 атм), а его температура $\sim 500^\circ C$. В составе атмосферы в основном двуокись углерода; кроме того, присутствуют следы водорода: на высоте 1000 км его концентрация близка $\sim 10^9$ m^{-3} .

А т м о с ф е р ы Ю п и т е р а и С а т у р н а схожи. В их составе H_2 ; Не; CH_4 ; NH_3 ; следы других газов.

А т м о с ф е р а Т и т а н а состоит главным образом из N_2 с примесью NH_3 и CH_4 .

Самая удаленная от Солнца планета П л у т о н имеет атмосферу в ~ 300 раз менее плотную, чем земная: она состоит предположительно из CH_4 .

2. ВОЗДЕЙСТВИЕ КОСМИЧЕСКОГО ВАКУУМА НА УЗЛЫ И БЛОКИ БОРТОВЫХ НАУЧНЫХ ПРИБОРОВ

Благодаря экстремально малой концентрации вещества космическое пространство способно "поглощать" неограниченное количество газов и паров, которые могут выделяться с КА. Поэтому повышенные потери массы в результате десорбции, испарения и сублимации материалов являются наиболее характерным видом воздействий КВ на материалы и элементы КА. Особенность массопотерь в космосе состоит в том, что на поверхность КА возвращается очень малая часть улетающих с них газовых частиц. Эта особенность количественно характеризуется коэффициентом возврата Z , равным отношению числа возвратившихся к поверхности КА частиц к числу испарившихся с нее.

Сублимация приводит также к существенным изменениям структуры и свойств поверхности конструкционных материалов КА и их покрытий.

Поверхностные напряжения, загрязнения, техническая предыстория и другие плохо контролируемые факторы могут изменять характер и величину массопотерь. Поэтому расчетные оценки этих потерь на основе известных моделей дают лишь приближенное представление о реальных про-

цессах в космосе. По этой причине большое значение приобретает изучение этих процессов в наземных установках в условиях, имитирующих либо моделирующих космические.

В космическом пространстве на материалы воздействуют также интенсивно электромагнитные и корпускулярные излучения. Совместное воздействие КВ и излучений, как правило, усиливает эффекты массопотерь. Это особенно характерно для материалов, эффективно поглощающих лучистые потоки, например, терморегулирующих покрытий на основе Fe_2O_3 и ZnO , поглощающих ультрафиолетовые излучения.

Под воздействием КВ возникают и другие специфические поверхностные явления. Это, в первую очередь, возрастание адгезии и когезии и, как следствие, ухудшение характеристик трения и износа; изменение оптических свойств и шероховатости поверхности; изменение коэффициентов аккомодации тепловой энергии при взаимодействии газа с поверхностью; распыление поверхности набегающими потоками ионов и нейтральных газовых частиц и др.

Космический вакуум заметно изменяет также ход тепло- и электрофизических процессов. В КВ практически отсутствуют конвективная теплопередача и теплопроводность газа. Теплопроводность воздуха при давлении 10^{-2} Па, к примеру, составляет всего $\sim 1\%$ его теплопроводности при атмосферном давлении. В условиях КВ к тому же затруднен теплообмен путем теплопроводности через стыки статически соприкасающихся между собой частей КА из-за образующихся вакуумных промежутков между микронеровностями контактных поверхностей. Поэтому теплообмен в космосе осуществляется преимущественно лучистыми потоками. КВ представляет собой естественную защиту от пробоев и разрядов в электрических цепях. Вместе с тем интенсивные потери массы БНП в КВ могут привести, по крайней мере, кратковременно к созданию вакуумных условий, способствующих развитию электрических пробоев и разрядов в парах и газах, увеличению поверхностных токов утечки и, как следствие, к нарушению нормального функционирования и даже повреждению электрических цепей БНП. Такими же последствиями чревата переконденсация металлических пленок на электрических коммутационных устройствах.

В условиях КВ возрастает опасность некоторых других неблагоприятных факторов — утечки газов и паров из замкнутых полостей, снижения физико-механических характеристик материалов и т.п.

Рассмотрим более подробно физические особенности основных из перечисленных видов воздействий КВ на материалы и конструкции КА.

2.1. МАССОПОТЕРИ

Газовыделение присуще любому веществу, либо материалу, помещенному в вакууме. Этим термином (газовыделение) на практике обозначается несколько физических процессов, одновременно протекающих в реаль-

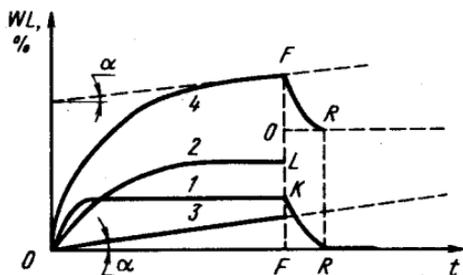


Рис. 1. Кинетика массопотерь матери-
алов в КВ:

1 — потери атмосферных газов, сор-
бированных материалом; 2 — потери
загрязнений и (или) добавок; 3 — по-
тери в результате испарения (субли-
мации); 4 — суммарные потери мас-
сы образца; F — окончание экспози-
ции в вакууме; R — частичное вос-
становление массы образца

ных телах: десорбция атмосферного газа, адсорбированного поверхностью БНП; диффузия и десорбция газа, адсорбированного твердыми стенками БНП; диффузионный перенос газа через тонкие стенки БНП и его последующая десорбция; испарение (сублимация) жидкости (твердого тела) (рис.1).

Количественные соотношения, описывающие эти процессы, следующие.

В равновесных стационарных условиях удельные скорости адсорбции q_a и десорбции q_d равны между собой, т.е.

$$q_a = q_d, \quad (1)$$

причем

$$q_d = G/\tau \quad (2)$$

и

$$q_a = \alpha V_0. \quad (3)$$

При малых степенях заполнения поверхности стенок БНП количество адсорбированного газа G пропорционально давлению и времени, так что

$$G = k\sqrt{T_g/M} \alpha \Delta P \tau p \quad (4)$$

В формулах (2)...(4) τ — постоянная времени "жизни" молекул адсорбированного газа на поверхности БНП; α — коэффициент прилипания молекул; p — давление газа; M — молекулярная масса газа;

$$V_0 = k\sqrt{T_g/M}$$

— объем газа, соударяющегося с единичной площадкой в единицу времени;

T_g — температура газа; в СИ $k = 36,4 \left[\frac{\text{м}^3/\text{с}}{\text{м}^2} \left(\frac{\text{а.е.м.}}{\text{К}} \right)^{0,5} \right]^{-1}$.

По формуле Френкеля

$$\tau = \tau_0 \exp(\Delta E/RT_g), \quad (5)$$

где $\tau_0 \approx 10^{-13}$ — период колебаний кристаллической решетки твердого тела при $T = 300 \text{ К}$; ΔE — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная.

Для количественных оценок кинетики адсорбции формулу (4) удобно выразить через время формирования на поверхности одного монослоя

адсорбированных молекул. В частности, для воздуха при $T = 300$ К это время

$$\Delta t_0 = \frac{2,5 \cdot 10^{-4}}{\alpha p} \quad (6)$$

Например, при давлении 10^{-4} Па монослой формируется всего за 2,5 с (при $\alpha = 1$).

Сопоставляя формулы (2) и (5), легко получить температурные зависимости удельной скорости десорбции:

$$q_d = \left(\frac{G}{\tau_0} \right) \exp(-\Delta E/RT_s). \quad (7)$$

Значения ΔE при $T = 300$ К приведены в табл.2.

Удельная скорость десорбции определяется следующим соотношением:

$$q_d = \left(\frac{G_0}{\tau} \right) \exp(-\Delta t/\tau), \quad (8)$$

где G_0 – количество газа, адсорбированного на поверхности ко времени $\Delta t = 0$.

Например, для паров воды, адсорбированных на металлической поверхности при $T = 300$ К ($\Delta E \approx 10^5$ Дж · моль $^{-1}$; $G_0 \approx 4 \cdot 10^{-2}$ Па · м 3 · м $^{-2}$, удельная скорость десорбции через 1,5 часа после начала вакуумирования составляет $\sim 10^{-6}$ Па · м 3 · м $^{-2}$ с $^{-1}$).

Общее количество газа, остающегося на поверхности, при $p \rightarrow 0$

$$G = G_0 (1 - \exp(-\Delta t/\tau)). \quad (9)$$

Диффузия абсорбированного стенкой газа и его десорбция в вакууме описывается законом Фика:

$$q_{ab} = c_0 \sqrt{D/\pi \Delta t} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp(-n^2 L^2/D\Delta t) \right], \quad (10)$$

Таблица 2

Энергия активации десорбции различных газов (для десорбции газа с подложки того же отвердевшего газа)

Газ	Энергия активации десорбции, Дж · моль $^{-1}$
N $_2$	5813,4
O $_2$	5580,3
H $_2$ O	40629,6
Ag	6512,44
CO $_2$	25205,4
H $_2$	902,88

где q_{ab} — удельная скорость диффузионного газовыделения; c_0 — начальная концентрация абсорбированного газа; D — коэффициент диффузии, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; L — толщина стенки (в случае вакуумирования всей детали L — полутолщина ее стенки).

В начальный момент вакуумирования ($\Delta t \rightarrow 0$) удельная скорость диффузионного газовыделения максимальна и равна $q_{ab} = c_0 \sqrt{D/\pi \Delta t}$. Температурная зависимость коэффициента диффузии имеет вид:

$$D = D_0 \exp(-\Delta E/RT). \quad (11)$$

Величина D_0 для твердых тел варьирует между $\sim 10^{-6} \dots 10^{-3} \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Удельная скорость диффузионного газовыделения из пористых эластомеров при $T = 300 \text{ К}$ ($D_0 \approx 10^{-4} \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; $\Delta E \approx 5 \cdot 10^4 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}$; $D \approx 10^{-6} \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; $c_0 \approx 10^5 \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$). Через 1 час после начала вакуумирования составляет $q_{ab} \sim 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Удельные потоки газопроницаемости в зависимости от материала и толщины стенки и рода газа колеблются в пределах от 10^{-5} до $10^{-15} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Удельная скорость испарения (сублимации) чистого однородного вещества в неравновесных условиях, когда $p < p_s$, описывается формулой Кнудсена — Лэнгмюра:

$$q_i = c_i (p_s - p) / \sqrt{2\pi R M T_s}, \quad (12)$$

где q_i — масса вещества, испаряющегося (сублимирующегося) в единицу времени с единичной площадки; c_i — коэффициент испарения ($0 \leq c_i \leq 1$); p_s — равновесное давление насыщенного пара вещества при температуре T ; p — давление паров испаряющегося вещества.

Максимальная удельная скорость испарения, соответствующая условию $p \rightarrow 0$:

$$q_{i,max} \approx 5,8 \cdot 10^{-2} p_s \sqrt{M/T_s}. \quad (13)$$

К примеру, для силиконовой смазки при $T = 110^\circ \text{С}$, $M \approx 1000 \text{ а.е.м.}$, $p_s \approx 1 \text{ Па}$ максимальная удельная скорость испарения $q_{i,max} \approx 1,0 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Если испарение вещества сопровождается его диссоциацией либо структурными изменениями, коэффициент $c_i \ll 1$.

Удельная скорость неравновесной конденсации чистого вещества при $p_e > p_s$ равна:

$$q_c = c_c (p_e - p_s) / \sqrt{2\pi R M T_g} \quad (14)$$

где q_c — масса вещества, конденсирующегося в единицу времени на единичной площадке; c_c — коэффициент конденсации ($0 \leq c_c \leq 1$); p_e — эквивалентное давление пара, приведенное к температуре поверхности T_s , p_g — парциальное давление газа; T_g — температура газа

$$T_g > T_s \text{ и } p_e = p_g \sqrt{T_s/T_g} \quad (15)$$

Для многокомпонентных веществ картина существенно усложняется. Важную роль начинает играть химическое взаимодействие между компонентами; вместо величины p_g в формулу (12) должна подставляться величина $p_{s_i} \chi_i \gamma_i$, где p_{s_i} — давление насыщенного пара чистого i -го компонента; χ_i — концентрация (мольная доля) i -го компонента; γ_i — так называемый коэффициент активности. Так как концентрация i -го компонента в этих условиях зависит от времени, возможны ситуации, когда $q_i(t) \rightarrow 0$. В реальных условиях нередко испарение сопровождается химическими превращениями (например, окислением). В этом случае существенным становится не полное давление газовой среды, а парциальное давление кислорода p_{O_2} .

2.2. АДГЕЗИЯ, ТРЕНИЕ, ИЗНОС, СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В космическом вакууме в результате испарения поверхностных загрязнений поверхности твердых тел становятся весьма чистыми, вплоть до атомно-чистых*. Это возможно, к примеру, в тех случаях, когда газовые молекулы десорбируются, а окисные пленки механически разрушаются и удаляются при фрикционном взаимодействии или непосредственном контактировании твердых тел. Этому способствуют также повышенные температуры в зоне контакта из-за ухудшения условий охлаждения в вакууме, а также космические излучения. Восстановление защитных пленок на поверхности затруднено из-за низкого окислительного потенциала космической среды.

В результате возрастает адгезия (когезия) веществ и материалов БНП; кроме того, в шарнирах и других узлах могут возникать явления заедания и даже "холодной" сварки в точках контакта. Склонность к "холодной" сварке наиболее сильно выражена у тех металлов, которые способны, по крайней мере, частично к образованию твердых растворов или сплавов. К ним относятся, например, металлы с кубической кристаллической решеткой. У взаимно нерастворимых металлов адгезионные взаимодействия проявляются значительно слабее (табл.3).

На адгезию в вакууме сильное влияние оказывает адсорбция остаточных газов на контактных поверхностях. Поскольку адсорбционные пленки уменьшают силы поверхностного взаимодействия (табл.4). Как видно из табл.4, в наибольшей степени адгезионное взаимодействие ослабляют кислород и этилен. Адгезия контактных материалов оказывает определяющее влияние на работоспособность "открытых" узлов трения в вакууме. В атмосферных условиях быстро образующиеся поверхностные пленки, в частности окисные, уменьшают число и прочность адгезионных мостиков связи, снижая тем самым коэффициент трения f . В отличие от

*Атомно-чистыми условно называют поверхности, у которых на 1000 атомов основного вещества встречается один примесный атом.

Адгезионная способность контактных пар в сверхвысоком вакууме
($p \approx 10^{-9}$ Па)

Высокая	Низкая	Примечание
Fe – Al	Cu – Mo	
Cu – Ag	Ag – Mo	
Ni – Mo	Ag – Fe	
Ni – Ni	Ag – Ni	
	Ge – Ge	
	Ta – Cu	
	W – Cu	
	Al ₂ O ₃ (сапфир) -сталь	($p \approx 10^{-5}$ Па)

Таблица 4

Экспозиция*, необходимая для уменьшения адгезионной связи ряда металлов вдвое

Металл (чистота)	Газ					
	Воздух	Ar	C ₂ H ₄	H ₂	N ₂	O ₂
Al (99,99%)	- 1*	6	0	5	3	- 2,2
Cu (99,99%)	- 2,9	3	- 0,6	3	3	5
Mg (99,99%)	- 1	3	0	2	-	- 1
Pb (99,99%)	3	6	-	6	4	4
Ti (99%)	- 2	2	6,5	- 1,7	-	- 2

* Выражена в единицах $\lg[p\Delta t, \text{Па} \cdot \text{с}]$.

этого в условиях КВ поверхностные пленки восстанавливаются медленно. Как видно из рис.2, время, необходимое для восстановления таких пленок при давлении менее 10^{-8} Па, исчисляется десятками дней. Поэтому силы трения и износ деталей, находящихся в подвижном контакте, достигают при некоторых (критических) параметрах окружающей среды экстремальных значений, исключающих нормальную эксплуатацию механизмов.

Критическим параметрам среды соответствует равенство скоростей разрушения и восстановления на поверхности окисных и газовых пленок. Так как первый из этих процессов зависит от конструкторско-технологических решений и эксплуатационных режимов узла трения (скорости, нагрузки и т.п.), то и итоговый критический параметр будет зависеть от этих режимов. Это обстоятельство иллюстрируется рис.3, где показана типовая зависимость коэффициента f от давления газовой среды, окружающей пару трения. Видно, что критическая область находится в интервале $10^{-6} \dots 10^{-7}$ Па.

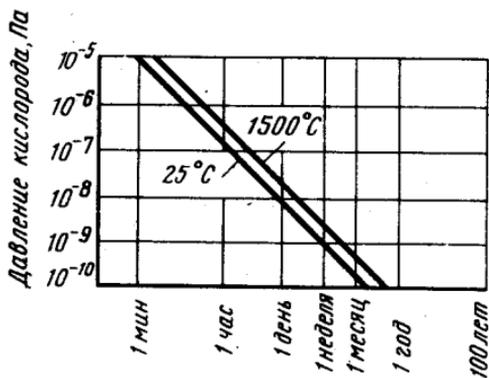


Рис. 2. Расчетная продолжительность образования на поверхности оксидной пленки FeO толщиной 1 Å в зависимости от давления кислорода

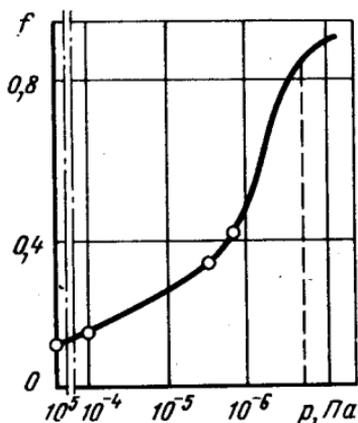


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения скольжения алмаза по алмазу от давления окружающей газовой среды

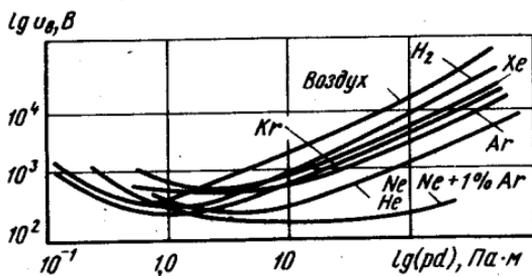
Иначе обстоит дело в "закрытых" узлах трения, в которых формируется локальная парогазовая "атмосфера". Обычно это благоприятно сказывается на работоспособности пар трения и подшипниковых узлов. Для предотвращения опасного роста коэффициента трения в условиях КВ широко используются разнообразные смазочные материалы. Чаще всего применяются "сухие" смазочные материалы на основе M_oS_2 , пленок металлов и т.п.; иногда используются также жидкие и консистентные смазочные материалы.

2.3. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ КВ

Космический вакуум способствует развитию электрических разрядов и пробоев, возникновению и увеличению токов утечки и других нежелательных электрофизических явлений в электронном и электротехническом оборудовании КА.

К возрастанию токов утечки приводит переконденсация легко испаряющихся веществ, материалов и адсорбированных пленок на более холодных участках неизолированных электрических цепей. Падение электрической прочности разрядных промежутков в условиях КВ связано с увеличением подвижности и быстрым ростом концентрации свободных носителей тока — электронов и газовых ионов. Эти явления, в свою очередь, вызываются изменением давления газа в области разрядных промежутков на различных участках траекторий КА и взаимодействием космических излучений — электронов, протонов, квантов электромагнитного излучения.

Рис. 4. Зависимость напряжения пробоя u_b от произведения (pd)



Способность к размножению носителей тока в газовом разрядном промежутке определяется, как известно, формулой Таунсенда:

$$I = I_0 \exp \epsilon V, \quad (16)$$

где I , I_0 — текущее и начальное значения электрического тока в газовом промежутке с характерным объемом V ; ϵ — напряженность поля в этом промежутке. Если носители тока образуются быстрее, чем они исчезают, то газ в межэлектродном промежутке становится электропроводящим. В противном случае решающую роль в развитии разряда играют ионизационные явления на электродах.

Электрическая прочность газовых разрядных промежутков описывается обычно кривыми Пашена, определяющими напряжение пробоя электрического промежутка в зависимости от Ppd , т.е. произведения давления газа на межэлектродное расстояние (рис.4). Ход пашеновских кривых сильно зависит от рода газа, формы, материала и состояния поверхности электродов.

Поскольку электронные блоки и узлы КА, как правило, закрываются полугерметичными экранами для защиты от космических излучений и обеспечения лучшего теплового режима, при выводе КА на орбиту давление в полости под экранами также снижается хотя и в меньшей степени, чем снаружи. В некоторый момент оно может достигнуть уровня, примерно соответствующего минимуму пашеновской кривой. Если в этот момент на разрядных промежутках имеется высокое напряжение, в них могут возникать пробои и разряды, опасные для работы аппаратуры в целом.

Расчетная оценка кинетики давления и воссоздания пробойных условий в полугерметичных полостях осложнена неопределенностью конфигураций каналов откачки и одновременным испарением различных веществ, приводящим к образованию в полости многокомпонентной газовой смеси. Поэтому самым надежным способом прогнозирования работоспособности электронной аппаратуры в условиях космоса пока являются их наземные испытания.

2.4. ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ХАРАКТЕРИСТИК

Под воздействием КВ могут видоизменяться наружные или внутренние поверхности раздела материалов БНП, в результате чего изменяются

и механические свойства материалов. Это может быть следствием появления либо развития микроскопических поверхностных трещин, а также интеркристаллитной коррозии. Удаление в КВ окисных и поверхностных защитных пленок оказывает особо ощутимое воздействие на свойства тех областей материалов и деталей, в которых существуют значительные механические напряжения. Из-за изменения свойств поверхностных слоев могут изменяться также прочность и другие объемно-механические свойства материалов.

Из-за удаления в условиях КВ газовых и окисных пленок и сублимации поверхностных слоев изменяются шероховатость поверхностей и, как следствие, их оптические характеристики, в частности коэффициенты поглощения солнечного излучения A_s и черноты ϵ .

В результате совместного воздействия высокого вакуума и ультрафиолетового излучения у "белых" терморегулирующих покрытий обычно возрастает отражательная способность. Органические краски подвержены изменениям в большей степени, чем неорганические.

При низких температурах оптические характеристики материалов существенно не изменяются из-за малых скоростей сублимации и газовой выделенности. Однако даже весьма малые потери O_2 , N_2 и H_2O в вакууме при высоких температурах могут вызвать значительные изменения излучательной способности некоторых керамик.

От состояния поверхностей БНП существенно зависит коэффициент аккомодации тепловой энергии, определяющий интенсивность обмена энергией между газом и твердой поверхностью. Например, коэффициент аккомодации для гелия на "чистом" вольфраме равен $\alpha_f \approx 0,017$, а на вольфраме с адсорбированной газовой пленкой $\alpha_f \approx 0,5$. Коэффициент аккомодации влияет на тепловой режим КА при его движении в плотных слоях атмосферы.

При движении КА в плотных слоях атмосферы, а также под действием бомбардировки заряженными частицами космических излучений происходит распыление материала. Преимущественное значение этот процесс имеет для передних (по направлению вектора скорости КА) частей КА. Слой распыленного материала обычно мал (до 50 – 100 Å в год). При движении КА в солнечном "ветре" или водородной короне Земли может происходить диффузия водородных ионов в поверхностные слои материала, в результате чего они обогащаются водородом (насыщение до 10 %), что приводит к изменению прочностных и оптических характеристик.

В результате газовой выделенности и потерь легколетучих компонентов при длительном пребывании в космическом вакууме могут изменяться свойства материалов.

На поверхностях диэлектриков могут накапливаться электрические заряды, приводящие к появлению поверхностных токов утечки и даже пробоям. Условия распространения высокочастотных электромагнитных сигналов вдоль поверхности проводника (скин-эффект) в КВ также изменяются.

2.5. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ МАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ В УСЛОВИЯХ КВ

Армированные и термореактивные смолы. Газовыделение этих материалов в условиях КВ обычно не приводит к деградации их свойств, но может вызвать коронный разряд и загрязнение соседних элементов.

Каучуки и резины. Экспозиция в вакууме вызывает газовыделение летучих добавок и продуктов деполимеризации основного полимера. Это приводит к изменению физико-механических свойств резинотехнических изделий и загрязнению окружающих деталей. Количественные оценки скорости газовыделения делаются обычно экспериментально для каждой рецептуры: результаты не могут быть надежно обобщены для всех типов резин, исключая фторированные и силиконовые резины. Силиконовые резины неприменимы в тех узлах БНП, где требуется низкая проницаемость уплотнителей, например, для гермоотсеков. Использование в БНП резин, содержащих пластификаторы, масла и другие нестабильные в вакууме ингредиенты, недопустимо.

Клеющие ленты. Экспозиция в вакууме при нагревании может вызывать газовыделение собственно полимера и клеящего вещества; кроме того, в процессе эксплуатации возможно выделение газов по граничной поверхности ее приклейки. Продукты газовыделения и захваченный воздух могут приподнимать ленту и вызывать ее вздутие, если лента не перфорирована.

Клеющие вещества выделяют конденсируемые продукты, которые являются опасными загрязнениями для оптики и электроники. Потеря этих веществ, которые часто являются пластификаторами, может вызвать отверждение адгезионных слоев и делать их неработоспособными. Практически каждый новый тип ленты должен быть испытан на газовыделение. Акриловые клеющие вещества, по-видимому, представляются наилучшими.

Иногда ленты перфорируют по всей поверхности, это позволяет эвакуировать захваченные и/или образованные в вакууме газовые пузырьки (в частности, у лент с металлической основой). Очищающие растворители могут повредить клеющие вещества и/или ленту или быть абсорбированными в них и затем диффундировать наружу во время экспозиции в вакууме.

Клеющие материалы. Экспозиция в вакууме вызывает выделение из непрореагировавших соединений, низкомолекулярных добавок и продуктов фотохимических реакций. Так как экспонированные поверхности являются, как правило, небольшими (только граничная линия), то и скорости газовыделений могут быть весьма малыми. Воздействий КВ на граничные связи почти не наблюдалось; некоторые выделившиеся ком-

поненты, однако, могут переконденсироваться и вызвать опасность загрязнений соседних электрических и оптических деталей. Многие эпоксидные смолы с малой скоростью газовой выделения весьма чувствительны к параметрам технологических режимов при отверждении, в частности, к влажности. Модифицированные эпоксидные смолы, в частности, жидкие, опасны для применения.

Почти все силиконовые материалы имеют аномально большое газовыделение.

Краски и лаки. Экспозиция в вакууме приводит к интенсивному газовыделению остатков растворителя и конденсируемых продуктов. Единственный путь устранения этого недостатка состоит в удлинении процесса варки и его проведении в вакууме. Даже в этом случае пригодны для БНП только очень немногие из промышленных красок и лаков. К тому же окрашенные объекты, содержащие электронные или другие термочувствительные блоки, не выдерживают высокую температуру варки. Во время периода обезгаживания лакокрасочные слои твердеют и становятся более хрупкими, но главным риском при их применении является загрязнение окружающей оптики и электроники. Неорганические краски обычно меньше загрязняют соседние детали, так как при нагревании они выделяют главным образом воду. Следует избегать применения полисульфидов, нестабильных в вакуумных условиях.

Металлы устойчивы в условиях КВ, за исключением наиболее летучих металлов таких, как *Cd* и *Zn*. Эти металлы легко сублимируют при температурах выше 100 и 150°C соответственно и могут образовывать электропроводящие осадки на изоляторах или непрозрачные осадки на оптических частях. Толстые и не треснувшие оксидные слои на металлах уменьшают их сублимацию.

Все металлы, находящиеся в КВ в контакте между собой, склонны к "холодной" сварке; при механическом скольжении и других процессах, сопровождающихся удалением окисных слоев, это явление усиливается.

Отверждающиеся композиты. Применение этих материалов в БНП сопряжено с теми же трудностями, что и для лакокрасочных покрытий. Закрытые ячеистые губки содержат газ (CO_2 или фреон), который выделяется в КВ крайне медленно. Некоторые губки могут использоваться для изоляции элементов вплоть до напряжений ~ 5 кВ. Загрязнение соседних деталей отверждающимися материалами иногда уменьшают путем их предварительного нагревания в вакууме или лакирования их поверхностей.

Пленки из пластика. Экспозиция в КВ приводит к деградации пластиковых пленок и в особенности тех из них, которые содержат пластификаторы. Опасность загрязнений окружающей среды продуктами газовой выделения этих пленок велика из-за их большой поверхности в БНП. Полиамиды, тефлоны, фептефлоны и политерфталаты безопасны в этом отношении. Системы из многослойных пленок должны иметь надежную вен-

тиляцию для исключения образования внутренних давлений между слоями в КВ. Эти системы имеют тенденцию аккумулировать большие количества загрязнителей во время технологических операций с ними и поэтому до использования в КВ они должны быть прогреты в вакууме на Земле.

Смазочные материалы. Особенности их использования в КВ связаны главным образом с испарением масел и "осушкой" консистентных смазочных материалов. Эти процессы особенно опасны для БНП в связи с повышенной температурой узлов трения.

Поверхностная "очистка" в вакууме вызывает расползание масел из мест их сосредоточения. Так, в частности, происходит с силиконовыми маслами. Жидкие смазочные материалы очень подвижны и способны загрязнить оптические и электрические детали. Некоторые "сухие" смазочные материалы также включают загрязняющие добавки (в частности, смолы-связки). Для предотвращения "холодной" сварки целесообразно покрывать трущиеся поверхности тонкими пленками металлов, трудно сплавляемых друг с другом.

Все движущиеся части в вакууме должны быть смазанными. Среди них механизмы и контактные кольца солнечных панелей, подшипники вращающихся антенн, механизмов систем ориентации, активного теплового регулирования и т.п. Движущиеся части иногда помещают в герметизированные отсеки, где ситуация более или менее сходна с земной.

Нейлон, иногда используемый в подшипниках, активно поглощает воду, которая затем выделяется в вакууме. Из-за этого стабильность нейлоновых подшипников невысока. Спеченный нейлон, однако, может быть предварительно вакуумно наполнен смазочным материалом и служить как бы его "резервуаром".

Стекла. Неорганические и большинство органических стекол стабильны в КВ. Единственную опасность загрязнения стекла создают клеяющие вещества для оптических деталей. Эти вещества могут загрязнять оптические детали конденсируемыми продуктами. Загрязненную поверхность стекла обычно очень трудно очищать от налетов.

Термопластические материалы. В космическом вакууме некоторые из материалов, главным образом стабилизированные различными добавками, деградируют из-за испарения этих добавок и пластификаторов. В этом случае имеется также большой риск загрязнения соседних деталей продуктами испарения этих добавок и случайными загрязнениями, содержащимися даже в очень малых количествах в термопластах. "Чистые" пластики (исключая поливинилхлориды, полиамиды, поливинилацетаты и бутираты) обычно в этом отношении безопасны. Электроизоляционные свойства пластиков после их осушки в вакууме на Земле улучшаются.

3. ПОЛЕЗНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОГО ВАКУУМА В ПРОЦЕССАХ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ И АСТРОИНЖЕНЕРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Использование космического вакуума в процессах космической технологии и разнообразных экспериментах на борту КА представляет большой научный и практический интерес. Здесь, в первую очередь, следует говорить об экспериментах с одновременным воздействием микрогравитации и вакуума (от высокого до сверхвысокого), а также только вакуума. К числу основных направлений использования КВ относятся: изготовление сверхчистых материалов и тонкопленочных солнечных элементов методами парового осаждения и молекулярно-лучевой эпитаксии; исследования физических свойств поверхности твердого тела, в частности, полупроводников; изучение взаимодействия энергичных атомарных и молекулярных газов с энергией в десятки эВ, а также ионов с поверхностью твердого тела; изучение химического состава поверхностей с помощью Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и т.д.

Несмотря на кажущуюся простоту технологическое и научное использование КВ связано с решением многих технических задач. С этой целью разработаны специфические приемы полезного использования КВ. Они зависят от требуемого уровня вакуума и степени газовыделения объектов. Эти приемы включают прямое использование КВ для откачки камеры, помещенной на борту КА, а также использование КВ для предварительной откачки камеры в комбинации с автономными высоко- и сверхвысоковакуумными насосами, размещенными на борту КА; создание защитных экранов, специальным образом ориентированных относительно вектора скорости КА (в дальнейшем — защита), для формирования зоны экспериментов за бортом КА с контролируемой концентрацией частиц.

Самый простой способ использования КВ заключается в откачке камеры, расположенной на борту КА. Простой расчет показывает, что в не прогретой камере из нержавеющей стали объемом $0,03 \dots 0,1 \text{ м}^3$, соединенной с "заборным" космосом трубкой длиной $300 \dots 500 \text{ мм}$ и диаметром 100 мм , легко получить фоновое давление $(5 \dots 10) \cdot 10^{-8} \text{ Па}$, которое достаточно для проведения многих экспериментов. Прогревая камеру, фоновое давление можно снизить до $10^{-7} \dots 10^{-9} \text{ Па}$.

Присоединяя непосредственно к камере автономные высоко- и сверхвысоковакуумные насосы, рабочее давление даже при таких сложных процессах, как плавка металлов, можно поддерживать на уровне $(1 \dots 5) \cdot 10^{-4} \text{ Па}$.

Для проведения экспериментов при давлении $\sim 10^{-12} \text{ Па}$, что соответствует концентрации молекул $\sim 10^9 \text{ м}^{-3}$, необходимо устройство теневой защиты. Это устройство (рис.5) представляет собой полусферическую оболочку, ориентированную таким образом, чтобы открытая часть полу-

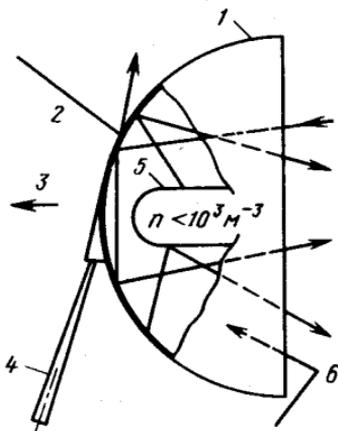


Рис. 5. Схема полусферического защитного устройства для получения экстремально высокого вакуума при проведении космических экспериментов:

1 – полусферическая защита; 2 – направление движения атмосферных газов; 3 – направление вектора скорости КА; 4 – телескопическая штанга; 5 – область экспериментов; 6 – молекулярные соударения за защитой

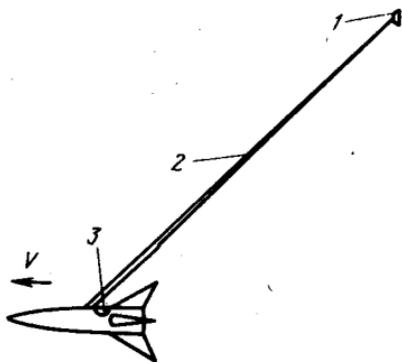


Рис. 6. Схема размещения защиты на пилотируемом ИСЗ:

1 – защита; 2 – телескопическая штанга; 3 – отсек со сверхвысоковакуумной камерой и автономной откачкой

сферы располагалась сзади по направлению вектора скорости КА и, следовательно, внутренняя часть полусферы экранировалась бы от набегающего газового потока. Устройство должно располагаться на телескопической штанге 2, выдвигающейся из орбитального КА на расстояние до 100 м (рис.6), либо на свободно летящих в космосе непилотируемых технологических КА (рис.7).

Полусферическая форма защиты в связи с наиболее благоприятным соотношением ее площади и объема способствует получению экстремально высокого вакуума. Поскольку на низких орбитах доминирующей компонентой атмосферы является атомарный кислород с относительно высокими концентрациями ($n \sim 10^{14} \text{ м}^{-3}$) и кинетическими температурами $\sim 10^3 \text{ К}$, получение на борту КА материалов высокой чистоты без такой "защиты" окажется, по-видимому,

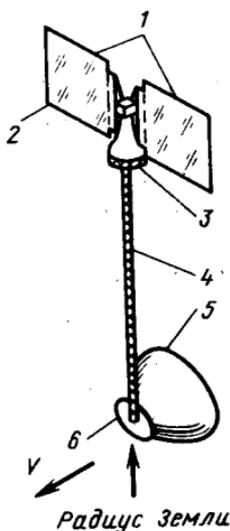


Рис. 7. Схема размещения защиты на непилотируемом КА:

1 – солнечные батареи; 2 – направление на Солнце; 3 – модуль системы; 4 – штанга; 5 – защита; 6 – вектор скорости КА

невозможным, хотя на больших удалениях от Земли атмосферный газ менее плотный и состоит главным образом из Н и Не. Однако и здесь для проведения прецизионных экспериментов требуется защита от примесных газов, источником которых является сам орбитальный КА. Расчеты показывают, что полусферическая защита, имеющая нулевое собственное газовыделение, предотвращает доступ в зону эксперимента молекул из области переднего полупространства. Число молекул, догоняющих КА и попадающих в зону эксперимента из области заднего полупространства, определяется соотношением скоростей $V_{КА}$ (орбитальная скорость КА) и V_m (наиболее вероятная скорость молекул). Таким образом, поток молекул, сталкивающихся с внутренней поверхностью защиты, будет состоять преимущественно из Н; плотность потока $\sim 10^{11} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что эквивалентно условиям в лабораторной вакуумной системе при комнатной температуре и давлении водорода $\sim 10^{-12}$ Па.

Если защита будет использоваться в сочетании с пилотируемым КА, то в его окрестностях должны будут наблюдаться обратные потоки атмосферных молекул, обусловленные соударениями с молекулами выделяющихся из КА газов. В этом случае суммарная концентрация молекул в зоне эксперимента будет определяться четырьмя источниками: атмосферным газом, газовыделением защиты, газовыделением исследуемых образцов, газовыделением, обусловленным КА.

При размещении защиты на непилотируемых КА (например, пассивных гравитационно стабилизированных аппаратах) устраняются загрязнения, связанные с наличием экипажа. Кроме того, становится возможным длительное (месяцы) прогревание деталей БНП, что необходимо для снижения фонового газовыделения. В частности, для получения за защитой концентраций молекул, эквивалентных давлению в зоне эксперимента $\sim 10^{-12}$ Па (300 К), удельная скорость газовыделения материала защиты не должна превышать $\sim 10^{-9}$ Па \cdot м³ \cdot м⁻² \cdot с⁻¹. Достижение столь низких десорбционных потоков возможно лишь путем высокотемпературной вакуумной тренировки нержавеющей сталей и других металлов.

4. ЛАБОРАТОРНОЕ (ФИЗИЧЕСКОЕ) МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЙ КОСМИЧЕСКОГО ВАКУУМА НА БОРТОВЫЕ НАУЧНЫЕ ПРИБОРЫ

Вначале оговорим различие между имитацией и моделированием воздействия КВ. Имитацией называют тождественное воспроизведение космических условий, а лабораторным (физическим) моделированием — их масштабное воспроизведение. Масштаб определяется одинаковыми результатами воздействий в моделирующей установке и в космосе. Так как лабораторное моделирование предполагает лишь эквивалентность результатов воздействий на исследуемый объект натуральных и лабораторных условий, то

последние при моделировании могут существенно отличаться от натуральных, смещаясь в сторону менее жестких значений (например, больших давлений в вакуумных установках и т.п.).

Главной задачей моделирования является определение реакций исследуемой системы на воздействия в функции параметров окружающей среды. Поэтому при лабораторном (физическом) моделировании параметры установки варьируются экспериментатором по желанию, в то время как при имитационных и натуральных экспериментах эти параметры предопределены и жестко фиксированы. Полученные в результате лабораторного моделирования закономерности позволяют прогнозировать поведение исследуемой системы в условиях натурального космического полета.

4.1. КРИТЕРИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Космический вакуум отличается от лабораторного крайним разнообразием физических условий и явлений. Перечислим важнейшие из них*:

а) низкая концентрация газовых частиц

$$n_* \ll 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3};$$

б) разнообразные массы и скорости частиц ($m_i; v_i$); широкие интервалы изменения скоростей ($10^2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \leq v \leq 10^6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$) и концентраций частиц;

в) низкий коэффициент возврата $Z_* \rightarrow 10^{-2} \dots 10^{-4}$ для частиц различных масс m_i ;

г) неограниченная поглотительная способность КВ ($V_s \rightarrow \infty$);

д) наличие различных типов излучений, например e, p, α, γ, hv).

С позиций моделирования воздействия КВ на материалы и элементы все факторы можно условно разделить на следующие виды: механические, тепло- и электрофизические и поверхностные (массопотери, адгезия, трение и износ). Моделировать тепло- и электрофизические, а также поверхностные воздействия невозможно без вакуумирования исследуемых БНП. При этом тепло- и электрофизические воздействия определяются концентрациями газовых частиц, а поверхностные — потоками частиц к поверхности или от нее.

При выборе условий и параметров лабораторного моделирования КВ в зависимости от целей и методики эксперимента выбираются:

а) вакуумные параметры установок (например, быстрота откачки, предельно низкие давления);

б) типы и комплексные схемы систем откачки (внешняя, внутренняя, "масляная", "безмасляная");

в) вид моделирования (вакуумное или комплексное);

*Здесь и далее индекс * снизу (n_* , Z_* и т.д.) относится к условиям в космосе; n_0 — число Лошмидта.

г) конструкции установок.

В табл.5 приведены ориентировочные давления в моделирующих установках различного назначения. Детализация условий моделирования, учитывающая специфику изучаемых процессов и явлений, делается на основе главного и частных критериев, выражаемых обычно в виде некоторого набора числовых характеристик. При формировании критериев необходим учет всего многообразия физических факторов воздействия КВ и технических возможностей современных вакуумно-технических средств; обычно один из таких факторов рассматривается как обязательный (общий), а

Т а б л и ц а 5

**Ориентировочные давления, требуемые
для лабораторного моделирования физических
явлений, происходящих в космосе**

Изучаемый процесс или явление	Давление
1. Механическая прочность герметичных корпусов КА при воздействии перепада давлений	$\sim 10^3$ Па
2. Исклучение воздушного демпфирования при вибрациях	$\leq 10^{-4}$ Па
3. Теплопередача излучением	$\leq 10^{-2}$ Па
4. Электрофизические явления в диэлектриках; электрические разряды в газах	$\leq 10^{-2}$ Па
5. Физические и механические свойства материалов (конструкционная прочность, ползучесть, внутреннее демпфирование)	$\leq 10^{-4}$ Па в зависимости от давления насыщенных паров исследуемых материалов
6. Работа ионных и плазменных двигателей	$\leq 10^{-6}$ Па
7. Холодная сварка	$\leq 10^{-5}$ Па
8. Массопотери:	Длина свободного пробега молекул должна быть больше характеристического размера камеры. Низкий коэффициент возврата
а) испарение*	То же
б) сублимация*	$< 10^{-4}$ Па и большая быстрота откачки
в) деструкция молекул	То же
г) окклюзия газов*	" "
д) абсорбция газов*	" "
е) адсорбция газов*	$10^{-6} \dots 10^{-12}$ Па
ж) химическое взаимодействие остаточного газа с материалом поверхности*	$10^{-5} \dots 10^{-12}$ Па
9. Сухое трение*	$10^{-6} \dots 10^{-12}$ Па

* При моделировании этих явлений наряду с полным и парциальным давлениями необходимо выдерживать соотношение между скоростью окислительных и восстановительных процессов. Кроме того, необходимо моделировать также состояние молекул остаточных газов (нормально атомизированное, возбужденное и т.п.) ввиду существенного его влияния на скорость поверхностных физико-химических реакций.

остальные — как дополнительные. Так, например, при моделировании механических воздействий обязательным фактором является перепад давлений, равный одной атмосфере ($\sim 10^5$ Па), и, следовательно, проведение испытаний в вакууме вовсе не обязательно. При моделировании остальных воздействий обязательным фактором можно считать отсутствие взаимных столкновений молекул газов, т.е. полагать число Кнудсена существенно большим единицы ($Kn \geq 5$).

Дополнительные факторы определяются более детальным анализом моделируемых процессов. На этой основе выбираются некоторые характерные давления p' , p'' , p''' и т.п. Естественно, что для моделирования отбирается наиболее низкое из них. Если это, например, p'' , то критерий моделирования запишется в форме

$$p \leq p'' \quad (17)$$

Остановимся на понятии главного критерия моделирования. Пусть p — давление в камере моделирующей установки, а p' , p'' , p''' и т.д. — характерные давления моделирования отдельных процессов (например, процессов газовой выделенной различных компонент), связанные между собой неравенством

$$p' < p'' < p''' \quad (18)$$

Если одновременно моделируются все или, по крайней мере, большинство процессов, т.е. проводятся комплексные испытания КА, то главным критерием моделирования будет $p \leq p'$. При этом вполне допустима реализация условия $p \geq p_*$, где p_* — давление в космосе.

Еще одним общим требованием к моделированию является разумная продолжительность испытаний τ (см. стр. 29).

Рассмотрим более подробно условия моделирования воздействий КВ при наиболее распространенных типах исследований.

Т е п л о б м е н. При вязкостном и молекулярно-вязкостном режимах течения газа передача тепла от испытываемого БНП к стенкам камеры осуществляется конвекцией Q_c , теплопроводностью газа Q_t и излучением Q_r , так что

$$Q = Q_c + Q_t + Q_r \quad (19)$$

При переходе к молекулярному режиму теплопроводность газа и конвекция становятся пренебрежимо малыми ($Q_c \approx Q_t \approx 0$). Точнее влиянием конвекции по сравнению с влиянием излучения можно пренебречь при условии, что безразмерные критерии Прандтля (Pr) и Грассгофа (Gr) находятся в следующих соотношениях: $PrGr \leq 260$ (объект и камера горизонтальные); $PrGr \leq 1000$ (объект и камера вертикальные).

Численно произведение $PrGr \sim (p')^2 l$, где l — расстояние от БНП до стенок камеры. Полагая $l \approx 1$ м, получим давление в камере p' , при котором конвекция практически отсутствует. Легко видеть, что $p' \approx$

$\approx 10 \dots 1$ Па. Аналогичным образом можно найти давление p'' , при котором пренебрежимо мала теплопроводность остаточного газа. Легко показать, что при температуре испытуемого БНП приблизительно 400°C вклад в тепловой баланс теплопереноса по газу не превышает лучистого теплопереноса при $p'' \cong 10^{-2} \dots 10^{-3}$ Па. Таким образом, для моделирования тепловых воздействий КВ должен выполняться критерий

$$p \leq p'' \quad (20)$$

При не очень высоких температурах испытуемого БНП для точного моделирования тепловых режимов необходимо, чтобы температура стенок камеры была менее 100 К при коэффициенте их черноты $\epsilon \approx 1$.

Э л е к т р о ф и з и ч е с к и е п р о ц е с с ы. Рассмотрим отдельно моделирование воздействий КВ при изучении влияния заряженных частиц и фотонов на материалы и элементы БНП и при возникновении пробоя и токов утечки при исследовании работоспособности негерметичной электронной аппаратуры БНП. Основным условием моделирования будет $K_n \geq 5$. Дополнительным для первой группы явлений будет условие сохранения частиц заряженными вплоть до их взаимодействия с БНП. Это условие можно представить в виде следующего неравенства:

$$\tau/t > 1, \quad (21)$$

известно что $\tau = \frac{1}{\sigma n v}$,

здесь τ — характерное время перезарядки; t — время пролета частиц; σ — эффективное сечение перезарядки; n — концентрация нейтральных частиц; v — средняя относительная скорость заряженных частиц.

Дополнительным при моделировании фотонного воздействия является условие сохранения интенсивности излучения при отсутствии неупругих взаимодействий, т.е. процессов возбуждения и ионизации. Так как

$$I = I_0 \exp(-\mu d), \quad (22)$$

где I — интенсивность излучения; I_0 — начальная интенсивность излучения; μ — коэффициент поглощения среды; d — длина пути излучения, так называемая оптическая "толща", то таким условием моделирования будет соотношение $\mu d \ll 1$, из которого вытекает, что

$$pd \ll 1 \quad (23)$$

Рассмотрим моделирование вакуумных условий применительно к третьей группе явлений. Введем определение закрытого узла. Таковыми будут электронный блок, узел трения и т.п., имеющие ограниченную газокинетическую связь с окружающим пространством. Для такого узла должно выполняться неравенство

$$U_\epsilon / U_0 \ll 1, \quad (24)$$

где U_ϵ — суммарная газокинетическая проводимость неплотностей щелей; U_0 — газокинетическая проводимость через воображаемую поверхность, описанную мысленно вокруг испытуемого узла БНП.

Контролируемыми электрофизическими процессами в закрытых узлах БНП являются появление токов утечки и пробоя вакуумного промежутка. В обоих случаях необходимо внешнее воздействие космического излучения, обуславливающее возникновение первичных электронов в результате стимулирования электронной эмиссии и ионизации газов в межэлектродном промежутке.

Для моделирования процессов появления токов утечки и пробоя необходимо использовать дополнительно следующие давления:

- а) для режима несамостоятельного разряда давление p' ;
- б) для режима пробоя давления p'' и p''' .

Численные значения этих давлений определяются конкретными задачами моделирования. Для закрытых узлов безразлична система откачки ("масляная", "безмасляная"), однако существенна кинетика изменения давления под кожухом прибора (подробнее см. стр. 37).

М а с с о п о т е р и . Общим условием моделирования массопотерь является отсутствие взаимных столкновений частиц газа ($Kn > 5$). Для уточнения величины давления в вакуумной камере p' можно использовать приведенное выше уравнение Ленгмюра – Кнудсена для скорости неравновесного испарения (сублимации).

Процесс испарения (сублимации) чистого вещества может протекать при условии, когда суммарное давление в камере $p_v \ll p_s$ (например, $p_v \approx 0,1 \cdot p_s \leq p'$). Это означает, что поток испаряющихся молекул намного превосходит поток частиц, возвращающихся к зеркалу испарения. Давление p_v будет определяться суммой парциального давления испаряемого вещества в камере p_i , приведенного к температуре поверхности испарения T_s , и давления остаточных газов p_f ; $p_v \approx p_i + p_f$. Обычно принимают, что $p_f \ll p_i$.

Особенность моделирования КВ может быть отражена введением коэффициента возврата Z ; в космосе $Z_* \rightarrow 0$. Одним из способов достижения малых значений Z является поддержание низкой температуры стенок камеры $T_w \ll T_s$. При этом вакуумные условия в камере становятся неизотропными и потоки частиц газа от БНП и со стенок камеры значительно отличаются друг от друга при условии пренебрежимо малого газовыделения со стенок камеры, т.е. давление

$$p_s \sim \exp(-\Delta E/RT_s) \text{ и } p_v \approx Z p_s. \quad (25)$$

Последнее условие автоматически выполняется при низкой температуре стенок камеры T_w (например, при температуре стенок T_w , близкой к температуре жидкого азота). Из (25) следует, что

$$p_v \approx \frac{F_e}{F_e + F_w} p_s, \quad (26)$$

где F_e и F_w — соответственно площади поверхности испарения материала и стенок камеры. Следовательно,

$$Z \approx \frac{F_e}{F_e + F_w} \quad (27)$$

Полагая $F_w \gg F_e$, получим $Z \approx \frac{F_e}{F_w}$. Следовательно, одним из условий малости коэффициента возврата является требование, чтобы поверхность стенок камеры F_w была на 2 ... 3 порядка большей поверхности БНП и представляла собой идеальную откачивающую поверхность.

Если процесс массопотерь зависит от химического состояния поверхностных слоев испаряемого или конденсируемого материала (окисленные, неокисленные), то в качестве еще одного условия необходимо использовать критерий $p_{O_2} < p'$. Массопотери компонентов сложного вещества при наличии одновременно идущих химических реакций окисления характеризуются уменьшающимися скоростями. Это приводит к "псевдоравновесному" состоянию, когда при заданной температуре T_s концентрация i -го элемента не понижается ниже некоторой "предельной" величины и испарение (сублимация) i -го компонента практически прекращается. Этот эффект определяется парциальным давлением кислорода p_{O_2} .

Адгезионные процессы. Общее условие моделирования адгезии в КВ $K_n > 5$. Основной принцип заключается в подборе такого вакуума, при котором за время испытаний адгезионные поверхности сохраняются "чистыми". Потоки частиц на поверхности в этом случае должны быть настолько малы, чтобы за время испытаний на них не образовывалось бы мономолекулярного слоя адсорбированного газа. Это условие записывается следующим образом:

$$\Delta t / \tau_m \leq 1, \quad (28)$$

где τ_m — время образования мономолекулярного слоя; Δt — продолжительность испытаний. Расчетное значение τ_m для "чистых" поверхностей при $\alpha = 1$ будет равно $\tau_m = \frac{2,5 \cdot 10^{11}}{p}$.

Согласно экспериментальным данным критерий (28) выполняется (для алюминия) при продолжительности испытаний $\Delta t \leq \frac{6 \cdot 10^{-5}}{p} \tau_u / \tau_c \leq 1$.

Фрикционные процессы критичны к потокам частиц на исследуемые поверхности. Общим условием для этих процессов является $K_n > 5$.

Дополнительные условия определяются принципом, согласно которому для сохранения поверхностей при трении металлических пар атомночистыми скорость разрушения защитных окисных слоев должна превышать скорость их восстановления.

В открытых узлах это достигается при выполнении следующего безразмерного отношения:

$$\tau_u / \tau_c \geq 1, \quad (29)$$

где τ_u — время жизни единичного пятна контакта; τ_c — время, в течение которого среда может существенно изменить фрикционные свойства поверхности (например, время образования на поверхности мономолекулярного защитного слоя).

Критерий (29) позволяет оценить величины пороговых давлений p_c , ниже которых влияние среды на фрикционный процесс можно считать пренебрежимо малым:

$$p_c \leq \frac{12n_m}{\alpha\tau} \sqrt{MT_g k / 3N_A} \quad (30)$$

где n_m — число молекул, необходимое для образования монослоя на площади 1 см^2 ; α — коэффициент прилипания молекул к поверхности трения; M — молекулярная масса газа; N_A — число Авогадро; T_g — температура газа; k — постоянная Больцмана.

При этих давлениях за время испытаний состояние поверхностей трения практически не изменяется.

Величина τ_u — связана с конструкторско-технологическими параметрами фрикционного процесса. Из (30) следует, что:

1) влияние вакуума на фрикционный процесс тем интенсивнее, чем выше нагруженность и быстроходность узла трения и ниже его износостойкость;

2) испытание узлов трения на работоспособность в вакууме можно осуществить при давлениях тем больших, чем выше быстроходность и нагруженность узла и ниже его износостойкость, т.е. при $p' \leq p_c$. Дополнительным условием при испытании открытых узлов трения является требование использования "безмасляных" систем откачки.

Для "закрытых" узлов трения (на примере шарикоподшипников) определяющим является следующий безразмерный критерий, уточняющий критерий (29),

$$\tau_c / \tau_a \leq 1, \quad (31)$$

где τ_c — время между двумя последовательными контактами фрикционных поверхностей; τ_a — время, необходимое для загрязнения поверхности трения на 1%, т.е. превращения их из идеально чистых в атомарно чистые.

При испытаниях закрытых узлов трения в отличие от аналогичных испытаний открытых узлов нет необходимости использовать "безмасляную" систему откачки, что обусловлено образованием локального "микrokлимата" в рабочих зонах трения, давления в которых превосходят давление окружающей среды*.

*Как будет показано в разд.5, локальный вакуум устанавливается иногда также и в открытых узлах трения (например, шарикоподшипниках).

4.2. ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССОВ. СООБРАЖЕНИЯ О ВОЗМОЖНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ КВ

К числу вакуумных испытаний, которые необходимо ускорять, следует отнести такие, которые моделируют процессы, протекающие в КВ весьма длительное время (месяцы, годы). В числе таких длительных процессов — массопотери, химические поверхностные реакции, фрикционные и другие процессы. Учитывая сложность и недостаточную разработанность этого вопроса, могут быть предварительно лишь намечены некоторые пути к его решению. Здесь, как и ранее, требуется дифференцированный подход при рассмотрении каждого процесса в отдельности. В первую очередь для ускорения может быть использовано требование стационарности процесса, определяемое условием малости время релаксации этого процесса по сравнению с его продолжительностью, т.е. $\tau_c \ll \Delta t$. В этом случае ускорение заключается в том что продолжительность испытаний принимается $\Delta t \gg \tau_r$, а результаты установившегося процесса распространяют на всю дальнейшую продолжительность процесса. Времена релаксации могут относиться как ко времени стабилизации давления в сильно "газящих" полутермичных объектах (например, в рабочих зонах шарикоподшипников), так и к становлению стационарности процессов, протекающих непосредственно в открытом космическом пространстве. В последнем случае при исследовании массопотерь следует отдельно рассматривать процессы десорбции, испарения, сублимации и диффузии.

В пределах стационарности процессов добиться их ускорения можно в основном двумя способами: повышением температуры и давления.

Ускорение испытаний путем повышения температуры. Температурные зависимости процессов позволяют рассмотреть вопрос об ускорении испытаний, например, по определению массопотерь. Увеличивая температуру от T_1 до T_2 , найдем, что соответствующий поток массопотерь увеличивается в $\frac{G_2}{G_1} = \exp\left[\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right]$ ($T_2 > T_1$) раз. Такое ускорение можно осуществить только в пределах термостабильности исследуемого материала БНП. Хотя процесс десорбции является практически нестационарным на всем протяжении (см.рис.1), однако здесь также возможно ускорение испытаний повышением температуры.

При испарении материалов БНП стационарный поток испаряющихся молекул при сравнительно невысоких температурах испытываемого БНП устанавливается за очень малые времена, на много порядков меньше любого реального характерного времени откачки камеры, так что процесс здесь является заведомо стационарным.

При сублимации дело обстоит несколько сложнее из-за наличия поверхностных пленок.

Продолжительность испытаний Δt должна быть много меньше характерных времен удаления пленки τ в космическом вакууме. Если же τ больше технически возможного времени моделирования, т.е. $\tau > \Delta t$, то дополнительным "временным" условием моделирования будет требование предварительного удаления соответствующих пленок любым возможным путем (прогреванием, ионной очисткой, ультрафиолетовым облучением и т.п.).

При исследовании процессов газовой выделении из объема материала стационарная скорость газовой выделении с поверхности (в космических условиях), очевидно, будет равна скорости потока газа из объема к поверхности. Транспортировка газа из объема к поверхности обычно осуществляется посредством диффузии. При ограниченной продолжительности испытаний скорость диффузии может оказаться "узким местом" становления процесса. Это означает, что за время испытаний скорость диффузии будет меньшей, чем скорость десорбции газа с поверхности БНП.

Для оценки времени становления диффузионного потока воспользуемся соотношением:

$$\tau_{ab} \approx \frac{L^2}{D} \quad (32)$$

где τ_{ab} — постоянная времени диффузии (характерное время выравнивания концентрации); D — коэффициент диффузии. Характерный линейный размер L имеет неодинаковый смысл при различных процессах газовой выделении: при термонагрузках — это толщина образца; при облучении — это характерная глубина поглощения излучения и т.п.

Поскольку величина коэффициента диффузии может изменяться в очень широких пределах (на 10 порядков и более) для различных материалов, то при этом временное условие моделирования $\tau_{ab} \ll \Delta t$ может оказаться невыполненным. В этом случае следует или увеличивать температуру T_s , или искать другие пути решения проблемы.

Другим примером ускорения исследуемых явлений повышением температуры может служить ускорение поверхностных процессов при повышении температуры (энергии) газовых частиц T_g , соударяющихся с этой поверхностью, и/или температуры поверхности БНП T_s . Характер изменения температуры (повышение, понижение) зависит от вида конкретного исследуемого процесса. Так, например, температурная зависимость константы скорости реакции химического поверхностного процесса в вакууме (например, процесса окисления) описывается уравнением типа уравнения Аррениуса

$$p = b' \exp(-\Delta E_a/RT_g), \quad 0 < p < 1, \quad (33)$$

где b' — постоянная, величина которой колеблется в пределах $10^0 \dots 10^2$; ΔE_a — энергия активации процесса ($\sim 10^2$ кДж · моль⁻¹).

Поэтому, повышение температуры падающего газа T_g , с одной стороны, способствует ускорению такого процесса, с другой стороны, поверхностный процесс в вакууме всегда связан с аккомодацией исследуемой

поверхностью соударяющихся с ней газовых частиц. Аккомодация ухудшается с повышением температуры T_g . Следовательно, для выявления условий максимального ускорения процесса, необходимо оптимизировать T_g и T_s .

Ускорение испытаний путем повышения давления (концентрации) или интенсивности потока газа к поверхности БНП. Так можно ускорять химические поверхностные реакции в КВ (например, окисление поверхностных слоев в процессе образования поверхностных защитных пленок и т.п.) и другие процессы.

При молекулярном режиме скорость подобного стационарного и равновесного процесса определяется, в первую очередь, интенсивностью потока молекул, соударяющихся с исследуемой поверхностью. Следовательно, при изотропных вакуумных условиях ускорения подобных процессов можно добиться повышением суммарного или парциального (например, p_{O_2}) давления в вакуумной установке. При неизотропных вакуумных условиях аналогичных результатов можно добиться повышением интенсивности молекулярного потока, падающего на исследуемую поверхность. Как вероятность, так и скорость протекания поверхностных процессов сложным образом связаны с интенсивностью набегающего молекулярного потока и поэтому, как правило, при ускоренных испытаниях существенна оптимизация параметров процесса.

4.3. МОДЕЛИРУЮЩИЕ УСТАНОВКИ

Наряду с космическим вакуумом другими факторами космоса являются:

- а) электромагнитные излучения Солнца, Земли и других небесных тел;
- б) корпускулярные излучения (радиационные пояса Земли, солнечный "ветер", космическое галактическое излучение и т.д.), состоящие из заряженных частиц (e, p, α и др.);
- в) электрические и магнитные поля Земли и других небесных тел;
- г) метеориты;
- д) невесомость.

Материалы, узлы и элементы БНП, а также БНП целиком подвергаются исследованиям и испытаниям в лабораторных установках, моделирующих некоторые условия космоса (моделирующие установки).

Моделирующие установки можно (условно) разделить на три группы, первые две из которых схематически изображены на рис.8.

а) *Установки тепловакуумных испытаний* (рис.8,а) предназначены для исследования тепловых балансов БНП. Для этого вначале исследуют распределение температур на тепловой модели БНП, которая совершенствуется до тех пор, пока не получатся требуемые значения температур

поверхностей БНП от + 10 до + 30°С. Измерения повторяются последовательно на прототипе БНП и затем на полетном варианте БНП с полным функционированием всех его подсистем.

По измеренным температурным полям рассчитывают температуры при различных положениях БНП на орбите (при прохождении через земную тень, при различных ориентациях, расстояниях от Солнца и т.п.), используя методы математического моделирования.

Рабочие давления при этих испытаниях составляют примерно $10^{-3} \dots 10^{-4}$ Па. Кроме того, необходимо моделирование солнечных и других электромагнитных излучений космоса.

б) Установки вакуум-температурных испытаний (рис. 8, б), в которых БНП испытывается при наиболее низких давлениях $p < 10^{-6}$ Па и экстремальных температурах цикла (обычно от - 70 до + 90°С), определенных ранее в ходе тепловвакуумных испытаний с функционирующими подсистемами. Как показывает опыт, элементы, склонные к отказам, обнаруживают себя с большой вероятностью в ходе этих испытаний. Установки таких типов являются обычно крупногабаритными ($V_{и} \sim 10^3 \dots 10^5 \text{ м}^3$).

в) Специальные установки, в которых моделируются более двух факторов окружающей среды (например, вакуум, температура и облучение и т.п.).

В них производятся:

а) исследования поверхностных явлений: адгезии, трения, "холодной" сварки движущихся частей; поведения солнечных батарей и конструкционных материалов под действием экстремальных факторов солнечного облучения или бомбардировки высокоэнергетическими заряженными частицами в вакууме (при $p \sim 10^{-9} \dots 10^{-14}$ Па);

б) исследования и калибровка БНП в условиях, приближенных к космическим (при $p \sim 10^{-6} \dots 10^{-6}$ Па);

в) исследования новых типов двигателей КА на химическом топливе, ионных и плазменных двигателей;

г) исследования распределения плотности молекулярных потоков внутри моделирующих установок или измерений давлений при неизотермических и анизотропных вакуумных условиях;

д) исследования скафандров и другого оснащения космонавтов;

е) установки для приемки и исследования лунного вещества.

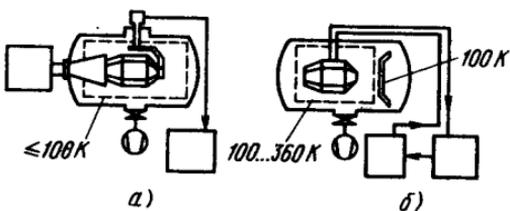


Рис. 8. Схемы моделирующих установок для:
а — тепловвакуумных; б — вакуум-температурных испытаний

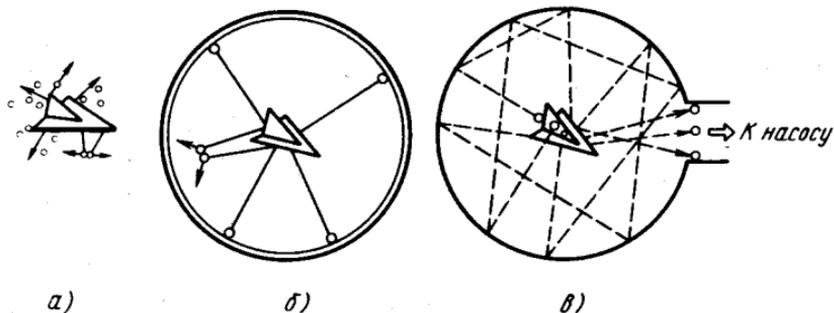


Рис. 9. Схема, поясняющая принцип построения вакуумных моделирующих установок

Установки этого типа являются, как правило, средне- и малогабаритными ($V_u \approx 1 \dots 10 \text{ м}^3$).

Простейшая схема моделирующей установки получится, если мысленно окружить КА сферой (рис. 9). Внутренняя поверхность сферы будет служить идеальной откачивающей поверхностью с весьма малыми ($Z \sim 10^{-2} \dots 10^{-3}$) коэффициентами возврата. Кроме того, КА в такой установке будет, с одной стороны, нагреваться излучениями Солнца, отраженным от планеты солнечным излучением (альбедо) и собственным ИК излучением планеты (Земля и т.п.). С другой стороны, тепло КА будет практически необратимо излучаться в окружающее "черное" и холодное (3 ... 4 К) космическое пространство, как излучение черного тела с температурой $T \approx 300 \text{ К}$. Кроме того, будет специфическим также состав остаточного газа в такой установке (табл.6).

Исходя из указанной схемы конструируются конкретные типы моделирующих установок. Основными частями их являются вакуумные и криогенные системы, а также имитаторы Солнца, орбиты, звезды.

Таблица 6

Сравнение давлений, типов газов, плотностей потоков и энергий для моделирующей установки и космической среды

Моделирующая установка

Давление, Па	Газ	Плотность молекулярного потока, $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Температура, К
$\sim 10^{-4}$	$\text{H}_2 \text{ O}$	$5 \cdot 10^{18}$	300
$\sim 10^{-6}$	$\text{H}_2 \text{ O}; \text{N}_2; \text{H}_2; \text{CO}$	$5 \cdot 10^{16}$	80 ... 100
$\sim 10^{-8}$	$\text{H}_2; \text{CO}; \text{CH}_4$	$1,4 \cdot 10^{15}$	80 ... 100
$\sim 10^{-10}$	$\text{H}_2; \text{CO}; \text{He}$	$1,4 \cdot 10^{13}$	4 ... 20
$\sim 10^{-13}$	$\text{H}; \text{He}$	10^{11}	4 ... 20

Космическая среда

Удаление, км	Тип газа	Максимальная плотность потока, $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Эквивалентная температура, К
200	$\text{N}_2, \text{O}_2, \text{O}, \text{Ar}, \text{He}, \text{H}$	$\sim 10^{20}$	$\sim 10^3$
800	$\text{O}, \text{He}, \text{H}, \text{N}_2, \text{O}_2$	$\sim 10^{16} \dots 10^{21}$	$\sim 10^3$
2000	$\text{He}, \text{H}, \text{O}$	$\sim 10^{15}$	$\sim 10^3$
Межпланетное пространство	$\text{H}^+ \text{e}$	$5 \cdot 10^{13}$	$\sim 10^8 \dots 10^{10}$

4.4. МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КВ

Требуется дифференцированный подход к вопросам моделирования ввиду разнообразия вакуумных условий в космосе, а также исследуемых процессов и явлений. Это реализуется путем создания в лабораторной моделирующей установке давлений остаточной газовой среды, соответствующих специфике исследуемого процесса или явления, определяемой частным или главным критерием моделирования. Также необходимо поддерживать в установке определенные состав и энергетические характеристики (температуру, скорость) остаточного газа. При этом особое внимание необходимо обратить на недопустимость его загрязнения парами рабочих жидкостей вакуумных насосов и других органических продуктов, отсутствующих в КВ. Кроме того, необходим низкий коэффициент возврата в установке и соответствие условий в ней другим специфическим характеристикам вакуумного моделирования, определяемым частными и главными критериями.

Частный критерий моделирования определяется спецификой исследуемого процесса или явления и может оцениваться аналитически или экспериментально. Для его аналитической оценки должны быть использованы общие и дополнительные условия. Эти условия в большинстве случаев определяются равенством скоростей конкурирующих процессов. Для экспериментального исследования наиболее важным и принципиальным является исследование на режиме $p = \text{var}$, т.е. изучение так называемой вакуумной характеристики процесса. Из изложенного следует, что для всех процессов и явлений имеются некоторые характерные величины пороговых давлений p_b (или точнее некоторые пограничные, переходные области давлений) на кривых зависимостей исследуемых параметров от давлений (режим $p = \text{var}$) при фиксированных других параметрах ($T = \text{const}$, $t = \text{const}$).

При более низких (или более высоких), чем p_b , давлениях величина исследуемого параметра, как правило, стабилизируется и перестает зависеть от давления окружающей среды. Поэтому моделирование воздействий космического вакуума в случае процессов, стабилизирующихся при давлениях ниже p_b , предполагает, в первую очередь, создание и поддержание в лабораторных моделирующих установках давлений $p \leq p_b$, а также других параметров моделирования.

Если же, наоборот, исследуемый параметр стабилизирован при $p \geq p_b$, а при $p < p_b$ изменяется (уменьшается или увеличивается), тогда основной задачей моделирования является исследование закономерностей процесса в этой области давлений в режиме $p = \text{var}$, а также в других (вспомогательных) режимах испытаний ($T = \text{var}$ и $t = \text{var}$). Результаты этих исследований позволяют в дальнейшем прогнозировать характер протекания процесса при других отличных от исследованных параметрах процесса (в космосе). Эти условия приводят к определению нескольких величин давлений $p_1; p_2; p_3$ и т.д., а также других параметров моделирующих установок (быстроты откачки вакуумных систем, вида системы откачки и т.д.). В качестве рабочего давления для моделирования выбирается наиболее низкое из них.

Главный критерий моделирования определяет давление в вакуумной установке при проведении комплексных испытаний БНП или КА целиком, при котором моделируются одновременно большинство частных процессов (вакуум-температурные испытания). Давления $10^6 \dots 10^{-7}$ Па достаточны для таких испытаний.

При проведении лабораторного моделирования необходимо принять минимальную продолжительность испытаний Δt_{\min} , равной (или несколько превышающей) продолжительности становления (релаксации) исследуемого процесса или явления τ_r .

5. ПРИМЕРЫ ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КВ

5.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КВ НА ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ УЗЛЫ БНП

При анализе физических процессов, происходящих в межэлектродном промежутке, прежде всего следует различать первичные и вторичные носители тока. Первичные носители образуются обычно под действием внешних факторов (излучений, термовоздействий и др.) на поверхностях электродов или в межэлектродном пространстве. Далее, носители, ускоренные приложенным электрическим полем, при столкновениях с атомами (молекулами) газа в объеме или при ударах об электроды порождают новые — вторичные носители. Последние при определенных условиях будут участвовать далее в аналогичных процессах. Переход от одного диапазона напряжения к другому приводит к относительному изменению роли процессов размножения носителей.

На практике по мере повышения величины межэлектродного напряжения u_w эти процессы будут приводить к возникновению следующих явлений:

а) (темновых) токов утечки;

б) предпробойных явлений, заключающихся обычно в возникновении квазипериодически повторяющихся и самогасящихся импульсных сравнительно малых токов;

в) сильноточного разряда, сопровождающегося резким падением межэлектродного напряжения.

Размножение электронов в разрядном промежутке описывается формулой Таунсенда для полного тока I между электродами (16).

Выражение для αd может быть приведено к виду

$$\alpha d = K n^{-1} \exp\left(-\frac{u_i}{u_w K n}\right), \quad (34)$$

где u_i — потенциал ионизации газа.

Из (34) вытекает, что условие "неразмножения" $\alpha d \ll 1$ автоматически следует из условия $K n \gg 1$. Развитие самостоятельного разряда начинается по достижении некоторой критической величины $(\alpha d)_c$. Подставляя $(\alpha d)_c$ в (34), найдем уравнение для величины напряжения пробоя u_b . Так как $l \sim p^{-1}$, то $K n \sim (pd)^{-1}$, и, следовательно, $u_b = f(pd)$, что согласуется с законом Пашена. Эта зависимость имеет четко выраженный минимум, разделяющий вакуумную (левую) область от области высокого давления (правую) (см.рис.4). При рабочем напряжении $u_w < u_b$ разряд является слаботочным полусамостоятельным (управляемым). Такой разряд затухает при выключении внешних источников, образующих первичные носители тока.

Если же $\alpha d > (\alpha d)_c$ (т.е. практически при $u_w > u_b$), то происходит пробой вследствие того, что число электронов и ионов, а также их энергии становятся достаточными для лавинообразного образования новых носителей. В этом случае разряд продолжается и после отключения внешних факторов. Поэтому моделирование воздействий космической среды на высоковольтные узлы БНП требует учета и использования как вакуумных условий, так и иногда (см.рис.11) разнообразных типов ионизирующих излучений ($e, p, h\nu$ и др.). Последние обуславливают образование темновых токов и могут инициировать пробой как в натуральных, так и в лабораторных условиях.

Потоки ионизирующего излучения в космических условиях значительно превышают аналогичные потоки на Земле. Это обстоятельство способствует, а наличие вакуума в негерметичных блоках препятствует развитию разрядов.

Из двух механизмов образования первичных носителей обычно один доминирует. Когда число электронов $N^{(V)}$ в объеме намного превышает число электронов с поверхности $N^{(F)}$, т.е. $N^{(V)} \gg N^{(F)}$, основной вклад

в образование первичных носителей будут вносить электроны ионизации в объеме.

Для систем с межэлектродным расстоянием $d \approx 1$ см требуемое давление моделирования $p' \sim 10^2$ Па. Так как процесс образования первичных носителей в объеме заведомо преобладает, то при моделировании необходимо воспроизводить: газовый состав и суммарную (от воздействия всех видов излучений) ионизацию в объеме.

Условие $N^{(V)} \ll N^{(F)}$ (при $d \approx 1$ см) реализуется при давлениях $p'' \ll \ll 1$ Па, и электронами ионизации в объеме можно полностью пренебречь. Моделирование в этом случае сводится к воспроизведению полного числа электронов $N^{(F)}$, выбиваемых из катода при его бомбардировке всеми видами излучений в широком спектральном диапазоне.

Очень часто в рабочих условиях первичные носители образуются за счет автоэлектронной или автоионной эмиссии в результате высоких (≥ 100 кВ \cdot мм $^{-1}$) напряженностей электрических полей на неоднородностях электродов (шероховатости, выступы и т.п.). При этом отпадает необходимость в моделировании воздействий излучений. Моделирование одних только вакуумных условий оказывается вполне достаточным.

"О т к р ы т ы е" и "з а к р ы т ы е" у з л ы. С точки зрения задач моделирования существенно разными оказываются условия и требования для "открытых" и "закрытых" узлов. При эксплуатации "закрытых" узлов в космосе давление в полости под экранами будет снижаться по мере понижения давления окружающей среды (пуск КА и пребывание КА в космосе) и, наоборот, повышаться при входе КА в плотные слои атмосферы.

Давление p в полости узла под защитными экранами БНП будет (для закрытого узла) уменьшаться при понижении давления окружающей среды по следующему закону:

$$p = (p_0 - p_\infty) \exp\left(-\frac{S_p \Delta t}{V}\right) + p_\infty, \quad (35)$$

где S_p — быстрота откачки насоса; V — объем БНП под экранами; Δt — продолжительность откачки; p_∞ — величина установившегося давления при $\Delta t \rightarrow \infty$.

В некоторый момент времени p может стать равным критическому, соответствующему минимуму пашеновской кривой. Это тем более опасно, что при газовыделении в объеме в течение длительного времени и с постоянной скоростью это давление будет достаточно долго находиться в области критических значений (рис.10).

Достижение малых коэффициентов возврата может быть существенно упрощено, если в стенках экрана исследуемого узла предусмотреть калиброванное отверстие ("дюзю"), характеризующее заданной проводимостью ($u_d > u_{q\Sigma}$). Тогда требования к вакуумной установке упрощаются и сводятся к требованиям низкой вероятности возврата газовых частиц через

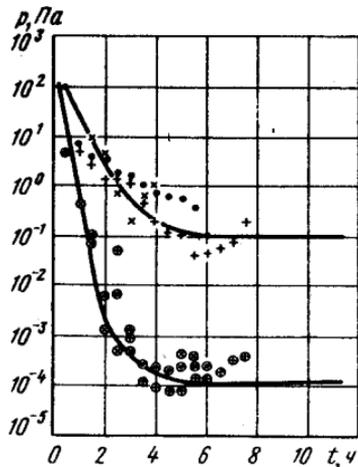


Рис. 10. Экспериментальная зависимость (три опыта) кинетики давления под кожухом высоковольтного преобразователя (\cdot + \times) и в вакуумной камере ($\odot \otimes$)

дюзу. Последнее выполняется путем создания поверхностей совершенной откачки не на всех стенках установки, а только на той их части, которая „видит” дюзу. „Закрытые” узлы нечувствительны к выбору систем откачки (масляная, безмасляная).

Моделирование ионизации в объеме может быть осуществлено с помощью любого, имеющегося в распоряжении экспериментатора, источника

ионизирующего излучения достаточной мощности (от ламп — источников У Ф излучения до циклотрона).

Существуют стандартные методы расчета потоков ионизирующей радиации за различной защитой в космических условиях. Поэтому соответствующие потоки частиц излучений под экранами прибора могут быть определены расчетным путем с достаточной для технических задач точностью.

Процедура лабораторного моделирования. Процедуру лабораторного моделирования воздействий среды на высоковольтные узлы и блоки БНП можно схематически представить следующим образом (рис.11). Прежде всего необходимо грубо оценить вакуумные условия в полости БНП под экранами и рассчитать величину pd . Затем „рабочее” напряжение прибора u_w следует сравнить с предварительно определенной из пашеновской кривой напряжением пробоя $u_b(pd)$. Здесь ситуация может приводить или к слаботочному несамостоятельному (полусамостоятельному) ($u_w < u_b(pd)$) или к самостоятельному ($u_w \geq u_b(pd)$) разрядам. В первом случае моделирование требует одновременного воздействия вакуума и излучений, во втором — воздействием излучений при моделировании не требуется.

Далее необходимо вновь проанализировать вакуумные условия и оценить число Кн. Если $Kn \geq 1$, то при самостоятельном и несамостоятельном разрядах процесс является поверхностным, т.е. рождение ($u_w < u_b$) и размножение ($u_w > u_b$) носителей будет происходить на поверхностях электродов. При этом, если на электродах могут наблюдаться высокие локальные напряженности электрического поля, то и при $u_w < u_b(pd)$ для моделирования достаточно будет воспроизведения только одних вакуумных условий. Если $Kn \ll 1$, то процессы являются объемными и требуется только вакуумное моделирование.

Далее по результатам исследований производится корректировка конструкции прибора и, если это требуется, повторный цикл исследований.

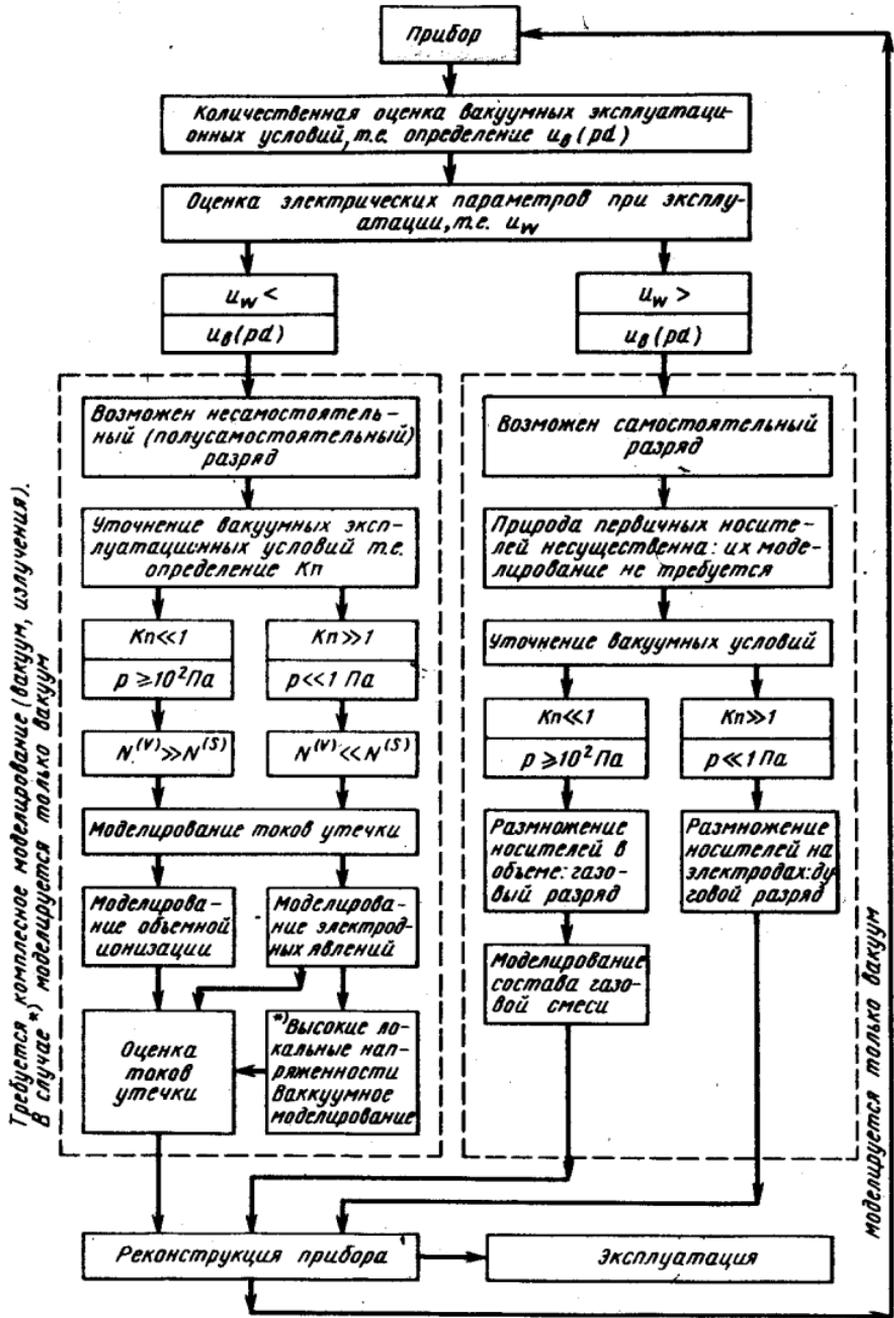


Рис. 11. Схема, иллюстрирующая процедуру теоретической и экспериментальной оценок лабораторного моделирования воздействия КВ при испытаниях высоковольтных узлов БПП

5.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЙ КВ НА ШАРИКОПОДШИПНИКИ

Одним из возможных подходов, облегчающих выбор условий и параметров моделирования, могут быть соображения о наличии пороговых давлений окружающей газовой среды, ограничивающих воздействие последней на процессы трения и износа в подшипниках.

Ввиду того, что подшипник представляет собой сложный узел трения, характер проявления пороговых давлений p_b при его работе в разреженной газовой среде должен быть многообразным. Это многообразие определяется сложностью взаимодействия деталей подшипника между собой и окружающей разреженной газовой средой.

Ранее в литературе было сделано допущение о наличии локального "микrokлимата" в рабочих зонах шарикоподшипника из-за собственного газовыделения материалов и малой пропускной способности его элементов. Газовый состав в рабочей зоне естественно может существенно отличаться от газового состава окружающей среды.

Работа шарикоподшипника в КВ обуславливается особенностями трения материалов в вакууме и характеристиками вакуумной системы шарикоподшипник – окружающая среда.

Для условий трения в шарикоподшипниках величина давления p_c определяется из следующего безразмерного соотношения (критерия) (31). Для шарикоподшипников

$$p_c \leq 10^{-10} \frac{\lambda z n_i (MT)^{1/2} (1 + \xi)}{\alpha}; \quad (36)$$

$$\tau_m = \frac{2,5 \cdot 10^{-4}}{\alpha p_m}, \text{ с}; \quad (37)$$

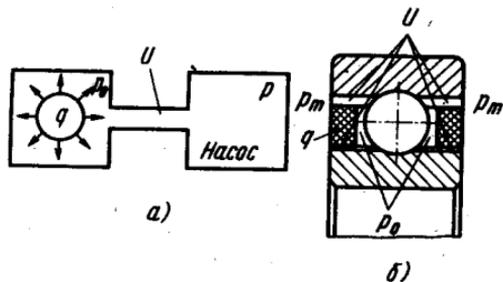
$$\tau_c = \frac{60}{n_s} = \frac{1,2 \cdot 10^2}{z n_i (1 + \xi)}; \quad (38)$$

$$\xi = \frac{d}{D_0} \cos \beta, \quad (39)$$

где λ – коэффициент шероховатости поверхности; z – число шариков в подшипнике; n_i – частота вращения внутреннего кольца, об · мин⁻¹; n_s – частота вращения сепаратора, об · мин⁻¹; β – угол контакта; d – диаметр шарика; D_0 – диаметр окружности, проходящей через центр шариков; p_m – давление окружающей среды или локальное давление в рабочей зоне шарикоподшипника.

Методы определения величины предельно низкого давления p_u в шарикоподшипниках, предназначенных для эксплуатации в КВ. Влияние вакуума на процессы трения и износа деталей подшипников ограничивается величиной порогового давления p_b , за пределами которого дальнейшее понижение величины давления окружающей среды p_m не вызывает существенного изменения этих процессов. В зоне взаимодействия фрикционных поверхностей подшипников, из-за ограниченной газокинетической связи с окружаю-

Рис. 12. Схема вакуумной системы, эквивалентной шарикоподшипнику (а) и схема его элементов (б)



щей средой и значительного газовыделения элементов подшипника и смазки, устанавливается предельно низкое давление p_u . При работе подшипника в вакууме его детали в той или иной степени являются источниками газовыделения.

Учитывая ограниченную проводимость каналов, связывающих внутренние полости подшипника с окружающей средой, систему подшипник – окружающий вакуум можно рассматривать просто как некоторую эквивалентную вакуумную систему (рис.12). На рис.12 изображен также элемент подшипника в разрезе. Течение газа в такой системе в стационарном режиме описывается следующим уравнением:

$$Q = (p_0 - p_m) U \text{ или } p_0 = p_m + \frac{Q}{U}, \quad (40)$$

где p_0 – давление внутри рабочей полости подшипника; p_m – давление окружающей среды; Q – суммарная скорость газовыделения с поверхностей деталей в полости подшипника; U – проводимость щелей и зазоров, соединяющих внутреннюю рабочую полость подшипника с окружающей средой.

При условии $p_m \ll \frac{Q}{U}$ давление $p_0 \approx \frac{Q}{U}$ и достигает своего наименьшего значения. Это давление назовем предельно низким p_u

$$p_u = \frac{Q}{U}. \quad (41)$$

Давление p_u остается постоянным до тех пор, пока существует газовыделение материалов деталей шарикоподшипника. Рассмотрим более подробно физический смысл величин Q и U . Q – суммарная скорость газовыделения элементов подшипника непосредственно в его внутреннем объеме, т.е. в зоне фрикционного контакта шариков с кольцами и сепараторами. Рассматриваемый объем образуется поверхностями шариков, желобов колец и цилиндрической поверхностью гнезд сепараторов. Все эти поверхности являются источником газовыделения, хотя и в неодинаковой степени. В большинстве случаев для шарикоподшипников БНП применяются самосмазывающие полимерные сепараторы, газовыделение которых на 3 ... 4 порядка больше, чем для стальных деталей подшипника. При этом основной газовыделяющей поверхностью следует считать лишь цилиндри-

ческую поверхность гнезд сепаратора. Газовый поток Q с этой поверхности определяется материалом сепаратора, общей поверхностью газовыделения F и температурой T . Величина Q рассчитывается по следующей формуле:

$$Q = qF, \quad (42)$$

где q — удельное газовыделение; F — площадь газовыделения.

Из (41) и (42) следует, что $p_u = \frac{F}{U}q$, т.е.

$$p_u \sim q \quad (43)$$

А так как $q \sim \exp(-\Delta E/RT)$, то и $p_u \sim \exp(-\Delta E/RT)$. Следовательно:

$$\ln q \sim (-\Delta E/RT) \text{ и } \ln p_u \sim -\frac{\Delta E}{R} \frac{1}{T}. \quad (44)$$

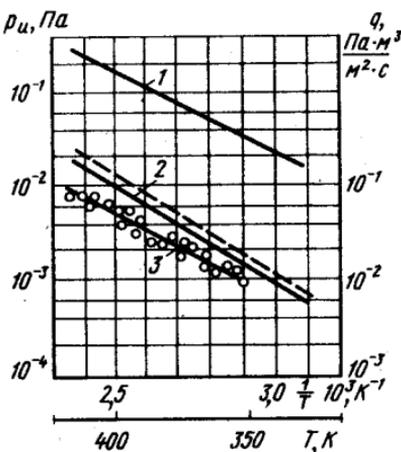
Отсюда зависимость $\ln p_u = f(T^{-1})$ будет иметь вид прямой линии, а угловой коэффициент этой прямой равен $-\Delta E/R$, где ΔE — энергия активации газовыделения, Дж · моль⁻¹; R — универсальная газовая постоянная. Температура является либо справочной величиной, либо измеряется экспериментально по известным методикам.

На рис.13 представлена температурная зависимость $q = f(1/T)$, определенная экспериментально в вакуумной лаборатории ВНИИПП для материала "Тесан-6", из которого был изготовлен сепаратор подшипников. Величина ΔE , рассчитанная из рис.13, оказалась равной $\Delta E \approx 16,72 \cdot 10^3$ Дж × моль⁻¹. Это может свидетельствовать о том, что преобладающий процесс газовыделения в подшипнике — десорбция физадсорбированных газов.

U — газокинетическая проводимость каналов, соединяющих рассматриваемую полость подшипника с окружающей средой. Этими каналами являются зазоры, образованные сепаратором и кольцом, а также стенками гнезда сепаратора и поверхностью шарика. При применении защитных шайб учитывается также сопротивление газовому потоку, вызываемое ими. U в молекулярном режиме постоянна и практически не зависит от давления окружающей среды, а определяется только типом смазочного материала, а также конструкторско-

Рис. 13. Температурные зависимости скорости газовыделения q материала "Тесан-6" (---) и p_u (—):

1 — расчетное давление в полости шарикоподшипника; 2 — расчетное давление в полости манометрического преобразователя; 3 — показания преобразователя № 2



технологическими параметрами подшипника (режимом работы, геометрией и устройством подшипника). Величину p_u можно рассчитывать, зная величину Q и U для данного подшипника. Экспериментальные исследования показывают, что для шарикоподшипников давления p_b могут проявляться двойко: либо, как это обычно принято для открытых узлов трения, в виде критического давления p_c , либо в виде предельно низкого давления p_u .

Шарикоподшипник представляет собой сложный узел трения, в котором рабочие поверхности имеют ограниченную связь с окружающей средой. Поэтому, если представить его в КВ как некоторую схематическую вакуумную систему (см.рис.12), то p_u будет аналогом предельного вакуума такой системы. Величина p_u определяется характеристиками "вакуумной системы" подшипника и не будет зависеть длительное время от давления окружающей среды p_m . Это обстоятельство подтверждает представления о наличии "микrokлимата" в шарикоподшипнике и позволяет рассматривать его как "закрытый" узел трения. На практике в зависимости от режимов работы для одного и того же шарикоподшипника могут реализоваться два случая: $p_b = p_c$ при $p_c > p_u$ или $p_b = p_u$ при $p_u > p_c$. В первом случае защитные пленки, определяющие антифрикционные свойства поверхностей, формируются из газа окружающей среды и тотчас же разрушаются. Во втором случае защитные пленки образуются из газа локального происхождения ["микrokлимат" из-за испарения (сублимации) материала деталей подшипника] и существуют устойчиво. В том и в другом случае характер фрикционных процессов в области давлений $p_m \leq p_b$ остается неизменным. Существование давлений p_b позволяет сформулировать оптимальные условия проведения испытаний шарикоподшипников при лабораторном моделировании воздействий КВ, реализующихся при $p_m \leq p_b$.

Экспериментальная оценка величины p_u при работе шарикоподшипника в вакууме. Для экспериментального подтверждения возможности образования предельно низкого давления p_u при работе подшипника в вакууме были проведены испытания шарикоподшипника 4И1 82К6Т. Так как уровень вакуум-метрической техники пока не позволяет измерять давление непосредственно в зоне подшипника, то в проведенном эксперименте давление измерялось у торца испытуемого подшипника (рис.14) малогабаритным манометрическим преобразователем ЛМ-5 (№ 2). Преобразователь № 1 измерял давление в камере.

Для уменьшения разницы давлений между зоной трения и штангелем манометрического преобразователя ЛМ-5 были сделаны пропилы между гнездами сепаратора и его торцем, обращенным в сторону измерительного датчика. На рис.15 представлены зависимости величин измеренного давления от температуры для подшипника 4И1 82К6Т с сепаратором из самосмазывающего материала "Тесан-6".

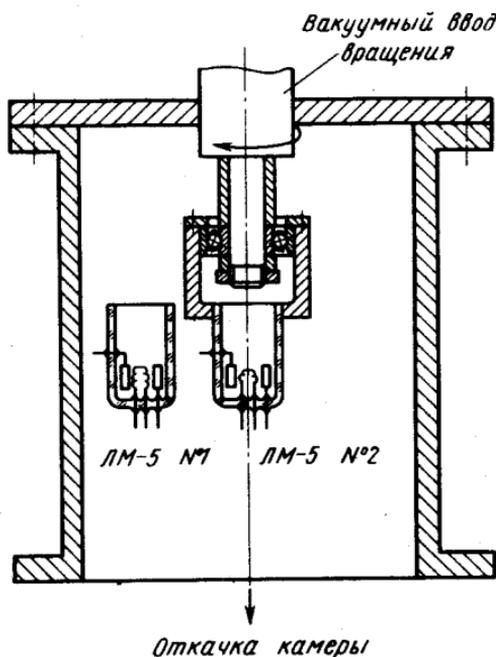


Рис. 14. Схема измерения давления p_0 в узле шарикоподшипника

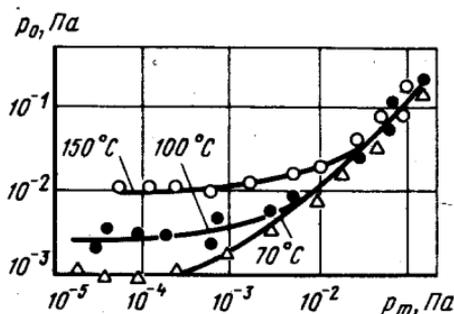


Рис. 15. Зависимость $p_0 = f(p_m)$ при испытаниях шарикоподшипников ($5 \times 13 \times 4$ мм) при частоте вращения 2000 об/мин и радиальной нагрузке 49,4 Н

Кривая 1 (см.рис.13) получена расчетным путем с использованием приближенного графоаналитического метода Монте-Карло для того же подшипника без пропилов в сепараторе. Кривая 2 получена расчетным путем, но с учетом пропилов в сепараторе, а кривая 3 получена экспериментальным путем.

Разница на порядок между кривыми 1 и 3 может быть объяснена тем, что давление измеряется на значительном расстоянии от зоны, для которой проводился расчет. Некоторую роль может играть также откачка газов преобразователем ЛМ-5 как ионным насосом. Полученные результаты хотя и не позволяют количественно оценить давление p_u в подшипнике, однако качественно указывают на наличие давления p_u в зоне трения при понижении давления окружающей среды, что отвечает зависимости (40). На рис.15 приведена зависимость $p_0 = f(p_m)$, ясно указывающая на наличие p_u . Расчетно-экспериментальные исследования величины подшипника с габаритами $5 \times 13 \times 4$ мм с сепаратором из самосмазывающего материала "Тесан-6" при температурах в диапазоне $20 \dots 200^\circ \text{C}$ показали, что $p_u \sim 10^{-3} \dots 10^{-1}$ Па.

6. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ УЗЛОВ И БЛОКОВ БНП

В табл.7 суммированы нежелательные явления, вызываемые воздействием КВ на материалы, узлы и блоки БНП, и приведены конструктивные способы, позволяющие уменьшить либо устранить эти явления.

Явления, вызываемые воздействием КВ, и конструктивные способы защиты от них

Явление, вызываемое воздействием КВ	Способ защиты
1. Сублимация (испарение) материалов	а) Использование материалов с низкими давлениями насыщенных паров б) Уменьшение температур материалов в) Нанесение защитных покрытий г) Выбор толщины материалов с допуском на сублимацию (испарение) за заданную продолжительность срока службы
2. Локальная "атмосфера", образующаяся вокруг БНП при газовыделении, которая может вызвать неконтролируемые напыления, "загрязнение" и другие эффекты	а) Подбор "негазовыделяющих" материалов б) Предварительное обезгаживание материалов, узлов и БНП целиком (возможно в наземных вакуумных установках)
3. Конструктивные приемы сохранения кожухов "защитных экранов"	Разгерметизация "защитных" экранов через калиброванные отверстия ("дозы") путем выравнивания давлений внутри и снаружи кожуха
4. Усиление адгезии и трения деталей и узлов механизмов БНП	а) Подбор специальных пар трения б) Использование специальных жидких, пластичных или твердых смазок в) Использование специальных конструкций узлов трения (ротапринтная пара, волновые передачи и т.п.) г) Герметизация узлов трения, полная или частичная ("закрытые" узлы)
5. Электрический пробой, "коронный" разряд и другие электрофизические явления	а) Выбор специальных изоляционных материалов б) Заливка компаундами в) Требования при конструировании высоковольтных узлов г) Разгерметизация "закрытых" узлов через калиброванные отверстия ("дозы") путем выравнивания давлений внутри и снаружи узла
6. Ухудшение теплопередачи	а) Посадка деталей с натягом б) Использование при контакте деталей тонких фольг, специальных смазок и т.п. в) Использование в конструкциях БНП тепловых "труб" г) Использование "заборного" вакуума для откачки полостей БНП
7. Ухудшение характеристик оптических узлов и деталей БНП	а) Исключение переконденсации легколетучих веществ на оптику б) Исключение перепадов температуры оптических деталей

М а т е р и а л ы. К настоящему времени накоплен богатый опыт по изучению поведения различных материалов в КВ. Большинство металлов и сплавов стабильно в КВ при температурах до 300 ... 400 К.

Из полимерных материалов наиболее пригодными для использования в КВ являются такие, которые не содержат наполнителей и пластификаторов.

У з л ы т р е н и я. Для разработки узлов трения и систем смазок движущихся частей механизмов применяются отдельно или комбинированно различные конструктивные приемы. Во-первых, могут использоваться уплотнения. Герметичное неподвижное уплотнение является более надежным, чем подвижное. Вакуумное уплотнение вокруг всех движущихся частей механизма дает максимальную защиту. Если движущаяся часть должна быть помещена в КВ, то для вращения вала с низкими скоростями может быть использовано полугерметичное уплотнение вала без существенных потерь на трение и износ. При высоких скоростях, но малых нагрузках для передачи движения через твердую стенку БНП может быть использован магнитный ввод движения; через гибкую стенку — так называемая волновая передача, сильфонный ввод и т.п.

Если невозможно создать стабильную "атмосферу" вокруг подшипникового узла, то применение полугерметичных уплотнений может обеспечить ограниченную по продолжительности работоспособность таких "закрытых" узлов трения.

Масла и пластичные смазочные материалы с низкими давлениями насыщенных паров и хорошими смазочными способностями широко используются в КВ в "закрытых" узлах трения. Скорости утечек этих смазочных материалов в КВ определяются экспериментально заранее в модельных экспериментах. Конструктивно в этом случае может быть использован метод подпитки (рис.16).

Наиболее широко употребляются твердые смазочные материалы на основе дисульфида молибдена и других материалов (например, золота, серебра). Применяется также метод ротационной смазки.

Э л е к т р о ф и з и ч е с к и е я в л е н и я. Испарение в КВ может вызвать существенные изменения характеристик элементов электронных цепей,

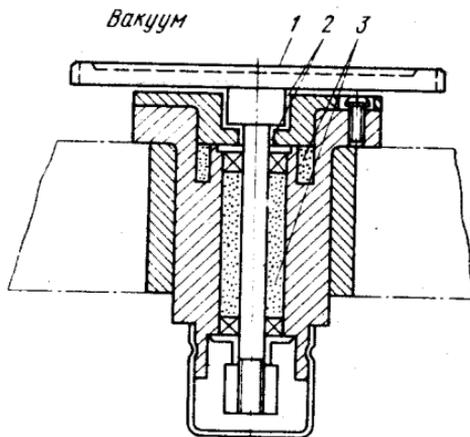


Рис. 16. Конструктивная схема подшипникового узла с "подпиткой":
1 — прерыватель; 2 — радиальные зазоры, через которые происходят утечки паров масла в КВ; 3 — масляный "резервуар"

например, пленочных сопротивлений микросхем. Поэтому эксплуатация такого оборудования может быть эффективной лишь при атмосферном (или близком к нему) давлении. Для этого такое оборудование следует помещать в герметизированные металлические контейнеры ("закрытые" электронные узлы) или заливать компаундами.

Если в "закрытом" узле, содержащем высоковольтный узел, имеются неконтролируемые течи, то при понижении под кожухом давлений до $\sim 10^2 \dots 10^{-1}$ Па в высоковольтном узле могут возникать разряды и пробой. Поэтому такой узел целесообразно снабдить калиброванными отверстиями ("дюзами"), которые обеспечивали бы быструю откачку полости под кожухом до безопасных давлений.

Для устранения газопроницаемости уплотняющих материалов (пластмасс и резин) рекомендуется применение фигурных прокладок между фланцами соединяемых деталей, в результате чего образуется несколько полостей со сравнительно небольшими перепадами давлений между ними.

Теплопередача. Для усиления теплопередачи через контактные поверхности рекомендуется использовать мягкие пленки материалов с хорошей теплопроводностью (например, медная фольга). Отдельные части БНП, контактирующие между собой, должны монтироваться с натягом. Для этих целей могут быть использованы также масла и смазки с низкими давлениями насыщенных паров, которыми смазываются контактирующие поверхности.

При недопустимости большого теплоотвода можно использовать откачку полостей БНП "забортным" КВ. В противном случае требуется использование специальных тепловых "труб" для сброса в КВ избыточного тепла.

Оптические приборы БНП. Как правило, современные оптические приборы БНП представляют собой сложные оптико-механические системы, содержащие наряду с оптическими также механические (узлы трения), электрические и электронные элементы. Примером могут быть телевизионные системы БНП. Поэтому воздействия на них КВ определяются, в первую очередь, воздействиями КВ на материалы (в том числе и материалы оптических элементов: стекла, линзы), их механические, электрические (электронные) узлы.

Особенностью же воздействий КВ на оптические приборы БНП является то, что КВ воздействует одновременно на их различные элементы, а суммарное воздействие не всегда будет определяться простым суммированием воздействий на отдельные элементы (синергетическое воздействие). Последнее может быть справедливо лишь в самых простейших случаях (простейшая геометрия).

Однако аналитическая оценка суммарных воздействий затруднена ввиду отсутствия теоретических разработок. Поэтому наиболее надежной считается экспериментальная лабораторная оценка суммарных воз-

действий КВ на оптические приборы БНП в условиях надежно моделирующих условия их эксплуатации в КВ.

Наиболее критичным является температурный режим оптических элементов БНП ибо рассогласование их температур может привести к "уходу" оптических осей приборов. Опасно также загрязнение оптических деталей продуктами испарения (сублимации) масел и смазочных материалов.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Чем отличается КВ от вакуума лабораторного?
2. Каковы краткие характеристики вакуума межзвездных и межпланетных пространств?
3. Каковы краткие характеристики атмосфер Земли, Луны, Меркурия, Марса, Венеры, Юпитера, Сатурна, Титана и Плутона?
4. Каковы основные воздействия КВ на материалы, узлы и блоки БНП?
5. На какие основные типы воздействия КВ можно подразделить?
6. Каково различие между моделированием воздействий КВ и их имитацией?
7. Что такое критерий моделирования воздействий КВ?
8. Чем различаются между собой главные и частные критерии моделирования воздействий КВ?
9. Примеры частных критериев при моделировании отдельных воздействий?
10. В чем заключается сущность лабораторной методики моделирования воздействий?
11. Основные типы установок для моделирования воздействий КВ?
12. Некоторые примеры лабораторного моделирования воздействия КВ на узлы и блоки БНП?
13. Каковы возможности полезного использования КВ в процессах космической технологии?
14. Каковы основные принципы конструирования узлов и блоков БНП, предназначенных для эксплуатации в КВ?
15. Каковы возможности ускорения лабораторных испытаний БНП?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрейчук О.Б., Малахов Н.Н. Тепловые испытания космических аппаратов. М.: Машиностроение. 1982. 148 с.
2. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды /Л.В.Козлов, М.Д.Нусинов, А.И.Акишин и др.; Под ред. акад. Г.И.Петрова. М.: Машиностроение, 1971. 217 с.
3. Нусинов М.Д., Пяк Б.Н., Черняк Ю.Б. Выбор критериев лабораторного моделирования воздействия вакуума на элементы конструкций научной космической аппаратуры. // Конструирование научной космической аппаратуры. М.: Наука. 1976. С.18.
4. Нусинов М.Д. Имитационные установки. М.: Машиностроение. 1980. 24 с.
5. Нусинов М.Д. Воздействие и моделирование космического вакуума. М.: Машиностроение. 1982. 176 с.
6. Трение и износ в вакууме /И.В.Крагельский, И.М.Любарский, А.А. Гуслияков и др. М.: Машиностроение. 1973. 216 с.
7. Фаворский О.Н., Каданер Я.С. Вопросы теплообмена в космосе. М.: Высшая школа. 1972. 193 с.
8. Силин А.А. Трение и его роль в развитии техники. М.: Наука. 1983. 175 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Космический вакуум	4
1.1. Межзвездные и межпланетные пространства	4
1.2. Атмосферы планет и Луны	4
2. Воздействие космического вакуума на материалы, узлы и блоки бортовых научных приборов	6
2.1. Массопотери	7
2.2. Адгезия, трение, износ, смазочные материалы	11
2.3. Электрофизические явления в условиях КВ	13
2.4. Изменение физико-механических и электрофизических свойств и характеристик	14
2.5. Особенности применения и эксплуатации материалов различных классов в условиях КВ	16
3. Полезное использование космического вакуума в процессах космической технологии и астроинженерной деятельности	19
4. Лабораторное (физическое) моделирование воздействий космического вакуума на бортовые научные приборы	21
4.1. Критерии моделирования	22
4.2. Временные характеристики процессов. Соображения о возможности проведения ускоренных испытаний КВ	29
4.3. Моделирующие установки	31
4.4. Методика лабораторного моделирования КВ	34
5. Примеры лабораторного моделирования КВ	35
5.1. Моделирование воздействий КВ на высоковольтные узлы БНП	35
5.2. Моделирование воздействий КВ на шарикоподшипники	40
6. Рекомендации по конструированию узлов и блоков БНП	44
Вопросы для самопроверки	48
Список литературы	48

Маркус Давидович
Нусинов

ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОГО ВАКУУМА НА МАТЕРИАЛЫ И УСТРОЙСТВА НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ

Редактор *Л.Ф. Ермилова*
Технический редактор *Л.М. Суковатова*
Корректор *Г.Л. Сафонова*
Н/К

Сдано в набор 6.06.86. Подписано в печать 4.12.86. Т-20862. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная Печать офсетная. Усл. печ. л 2,79. Усл. кр.-отт. 3,02.
Уч.-изд. л. 3,19. Тираж 1500 экз. Заказ 3577 Бесплатно.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство "Машиностроение"
107076, Москва, Б-76, Стромынский пер.,4

Отпечатано в Московской типографии № 9 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли. 109033, Москва, Волочаевская ул., 40, с оригинал-макета,
изготовленного в издательстве "Машиностроение" на наборно-пишущих машинах