

Васин В.А., Ивашов Е.Н., Кузнецов П.С., Степанчиков С.В.

РАСЧЕТ ТРИБОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДОВ ВАКУУМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Представлены методы расчёта трибоэкологических параметров, влияющих на загрязнение внутрикамерных объёмов вакуумного оборудования и дефектность, привносимую на обрабатываемые изделия электронной техники. Выполнен расчёт коэффициентов трения материалов, работающих в вакууме в зависимости от разрежения окружающей среды для случаев упругого и пластического контактного взаимодействия, а также расчёт интенсивности изнашивания пар трения в зависимости от нагрузки, микрогеометрии контакта, скорости скольжения, остаточного давления в вакуумной камере и механических характеристик материалов, применяемых в экологически совершенных приводах.

Ключевые слова: интенсивность изнашивания, коэффициент трения, микрочастицы износа, привносимая дефектность, экологически совершенный привод, вакуумное оборудование.

Специфика технологии электронного производства, основанная на использовании физико-химических свойств веществ и процессов, протекающих на молекулярном и атомарном уровнях и необходимость осуществления технологических процессов в экологически чистом вакууме требуют отличного от общепринятого в машиностроении подхода к конструированию оборудования. Стремление не только автоматизировать, но и роботизировать технологические процессы в вакууме заставляет разрабатывать надёжное, экологически совершенное оборудование, надёжность которого во многом зависит от надёжности работы узлов трения [1].

Сохранение «чистого» вакуума в процессе работы вакуумного оборудования электронного производства с размещением в рабочих вакуумных объёмах различных функциональных систем для ориентации и перемещения изделий относительно источников технологического воздействия, их транспортирования и межкамерного шлюзования в многомодульных системах является достаточно сложной комплексной задачей (рис.1) [2].

Рабочая камера служит основным рабочим пространством, в котором проводятся технологические процессы. В ней создаются условия, необходимые для протекания процесса, по возможности с оптимальными режимами.

Узлы источника материала, распыляемых частиц и крепления подложек с системами их нагрева являются важнейшими узлами, надёжность которых во многом определяет эффективность технологического процесса.

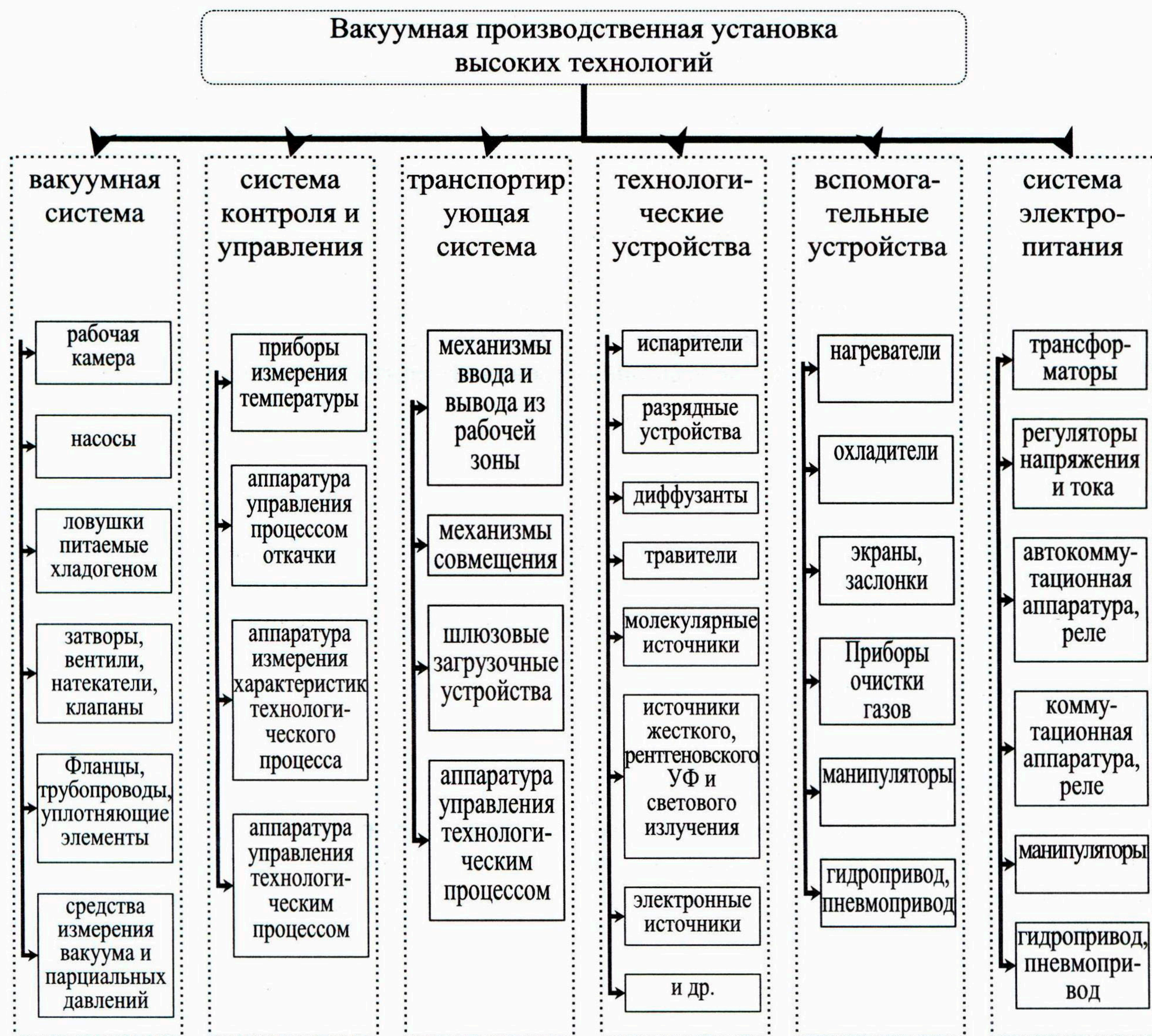


Рис. 1. Состав современной вакуумной установки высоких технологий электронного производства

Откачная и газораспределительная системы состоят из насосов, натекателей, клапанов, ловушек, фланцев и крышек, а также средств измерения разрежения или скоростей газовых потоков (рис. 1). Эти устройства должны обеспечивать высокую надёжность работы и производительность откачки при высокой герметичности систем, не допускающей «натекание» при отключении средств откачки.

Системы электропитания и блокировки обеспечивают надёжное и стабильное электропитание всех энергетических устройств аппарата и активную блокировку всех рабочих узлов.

Система контроля и управления состоит из набора датчиков, связанных через управляющий компьютер с исполнительными устройствами и информационными системами.

Система вспомогательных устройств и технологической оснастки состоит из внутрикамерных экранов, заслонок, манипуляторов, гидро- и пневмоприводов, устройств очистки газов (рис. 1).

Транспортирующие устройства состоят из механизмов ввода и вывода подложек из рабочей камеры, шлюзовых устройств, механизмов совмещения и др.

В то же время автоматизация сложных технологических процессов требует размещения в рабочих вакуумных объёмах внутрикамерных механических систем, которые во многих случаях являются источниками генерации “загрязнений”, так называемой привносимой дефектности вакуумной среды, в том числе наиболее опасным их видом – микрочастицами износа, которые, попадая на обрабатываемые объекты, значительно снижают выход годных изделий электронного производства.

При проектировании высоконадёжного, экологически совершенного вакуумного оборудования необходимо знать такие трибоэкологические параметры, как коэффициенты трения и интенсивность изнашивания материалов в условиях вакуума [3].

Анализ многочисленных экспериментальных данных по трению твёрдых тел в условиях вакуума показывает, что в общем случае коэффициент трения материалов определяется зависимостью вида [4]:

$$f = F_{адз} + \frac{F_{деф}}{T},$$

где $F_{адз}$ – сила адгезионного взаимодействия микронеровностей во фрикционном контакте; $F_{деф}$ – сила деформационного взаимодействия микронеровностей во фрикционном контакте; T – нагрузка, действующая на одну микронеровность, которая смоделирована в виде сферического сегмента пятна контакта.

Адгезионная составляющая силы трения определяется по формуле [5]:

$$F_{адз} = P \cdot E_{св} \cdot \frac{n}{КЧ \cdot d},$$

где P – вероятность образования адгезионных связей; $E_{св}$ – энергия связи; n – число граничных атомов на площадке контакта; $КЧ$ – координационное число для кристаллической структуры, находящейся в контакте; d – расстояние между ближайшими “соседями” в кристаллической решетке.

Если учитывать влияние окружающей среды, то среднее число атомов n на площадке контакта будет определяться выражением:

$$n = 2 \frac{A_{юв}}{\pi \cdot S_B},$$

где $A_{юв}$ – величина площадки контакта, на которой полностью отсутствует слой молекул адсорбированного газа; S_B – площадь элементарного базиса, зависящая от кристаллической структуры металла.

Величина площадки контакта определяется из модели шероховатости, показанной на рис. 2.

Ориентировочные значения параметров шероховатости приведены в работе [6].

В соответствии с работой [7] величина пятна контакта двух сфер радиуса R из различных материалов для случая их упругого взаимодействия определяется по формуле:

$$b = 1,4 \cdot \sqrt[3]{R^2 h_2 p_0 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}.$$

В случае же пластического контактного взаимодействия:

$$b = 0,618 \cdot \sqrt[3]{p_0 \frac{R h_2}{H_\mu}},$$

где R – радиус сегмента, в соответствии с рис. 2; h_2 – высота микронеровностей; p_0 – удельное давление в контакте; E_1, E_2 – модули упругости для материалов, находящихся во фрикционном контакте; H_μ – микронеровность более мягкого материала рассматриваемой пары.

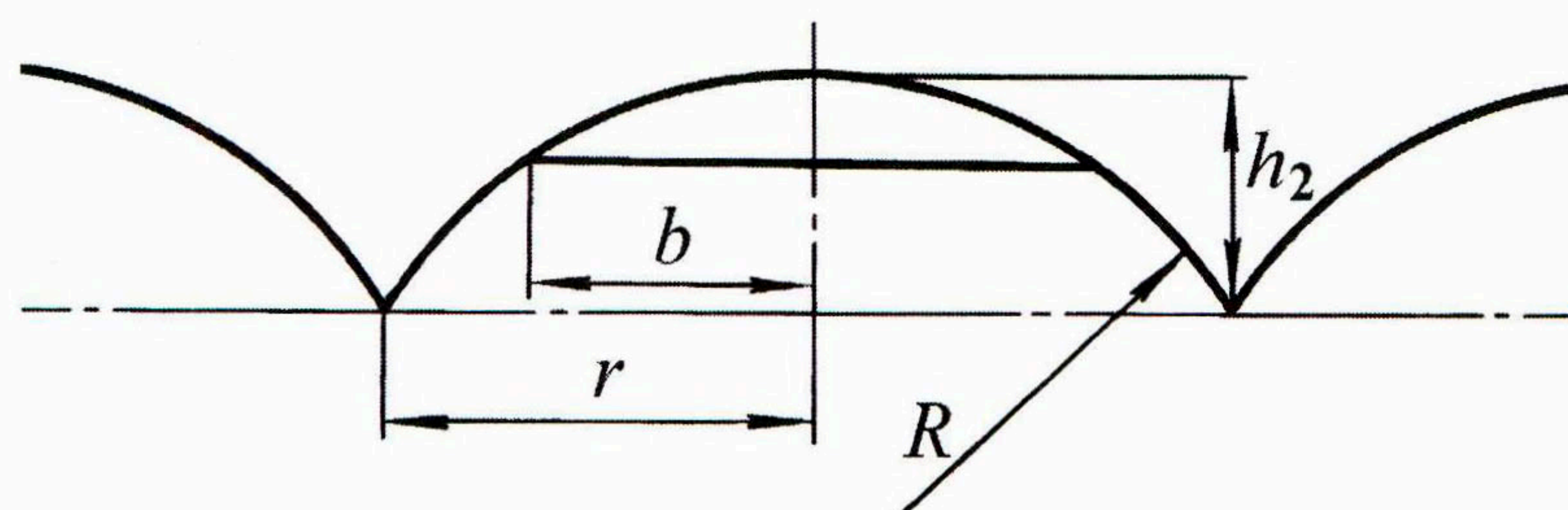


Рис. 2. Модель шероховатости реальной поверхности в виде сферических сегментов

Из работы [8] известно, что с учетом вероятности осаждения молекул на чистой поверхности при ударе время T , в течение которого происходит образование монослоя молекул на поверхности тела, определяется по графику (рис. 3).

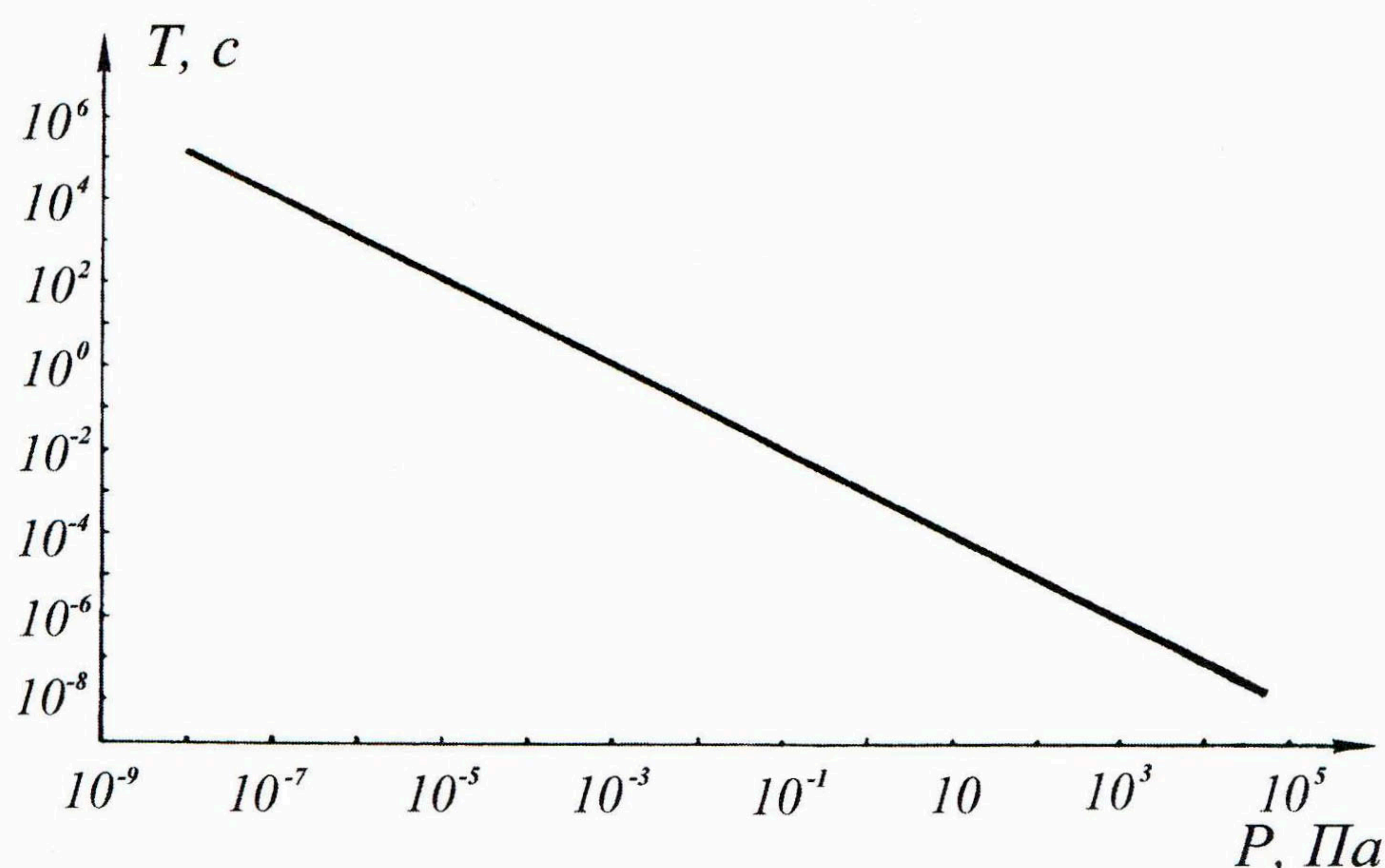


Рис. 3. Зависимость времени образования монослоя молекул на поверхности тела T от степени разрежения в вакуумной камере P

Осаждение молекул происходит в течение некоторого времени t между контактами микронеровностей, т.е. за время, в течение которого происходит перемещение фрикционного контакта с одних пар микронеровностей на другие. Время t является временем паузы

$$t = S / v,$$

где S – путь, пройденный микронеровностью до следующего контактного взаимодействия, $S = 2(r - b)$; r – радиус основания сегмента; v – скорость скольжения во фрикционном контакте.

Если $t = T$ то на поверхности фрикционного контакта образуется монослой молекул воздуха.

Если $t > T$, то на поверхности фрикционного контакта образуется полислой молекул воздуха.

Если $t < T$, то поверхность контакта покрывается лишь частично молекулами воздуха, а вся площадь контактного взаимодействия A_B условно делится на две

$$A_B = A_{адс.} + A_{юв.},$$

где $A_{адс.}$ – площадь единичного пятна контакта, покрытая адсорбированными молекулами; $A_{юв.}$ – ювенильная площадь контактного взаимодействия.

В зависимости от величины остаточного давления в вакуумной камере соотношение между $A_{адс.}$ и $A_{юв.}$ будет различным.

Адгезионное взаимодействие происходит лишь на площадке $A_{юв.}$. Введя параметр

$$K = \frac{t}{T} = \frac{A_{адс.}}{A_{адс.} + A_{юв.}},$$

$$\text{или } K = \frac{A_{с.} - A_{юв.}}{A_{с.}} = 1 - \frac{A_{юв.}}{A_{с.}},$$

получим

$$\begin{aligned} A_{юв.} / A_{с.} &= 1 - K, \\ A_{юв.} &= A_{с.} \cdot (1 - K). \end{aligned}$$

Тогда среднее число атомов n на площадке контакта, которые еще не закрыты монослоем молекул воздуха, равно:

$$n = 2A_{с.} \frac{(1 - K)}{\pi \cdot S_B}.$$

Сила деформационного взаимодействия микронеровностей во фрикционном контакте:

$$F_{деф.} = \sigma_{-1} \cdot b \left(R - \sqrt{R^2 - b^2} \right) - \text{при упругом контактном взаимодействии};$$

$$F_{деф.} = \sigma_T \cdot b \left(R - \sqrt{R^2 - b^2} \right) - \text{при пластическом контактном взаимодействии},$$

где σ_{-1} , σ_T – соответственно пределы усталости и текучести на смятие для более мягкого материала фрикционного контакта; b – ширина пятна контакта; R – радиус смоделированной микронеровности.

Конечные формулы для определения коэффициентов трения примут вид:

$$f = 2P \cdot E_{св.} \cdot A_{с.} (1 - K) + \frac{\pi \cdot S_B \cdot KЧ \cdot d \cdot \sigma_{-1} \cdot b \left(R - \sqrt{R^2 - b^2} \right)}{4\pi \cdot S_B \cdot KЧ \cdot d \cdot p_0 \cdot r^2} \quad (1)$$

- для упругого контакта;

$$f = 2P \cdot E_{св.} \cdot A_{с.} (1 - K) + \frac{\pi \cdot S_B \cdot KЧ \cdot d \cdot \sigma_T \cdot b \left(R - \sqrt{R^2 - b^2} \right)}{4\pi \cdot S_B \cdot KЧ \cdot d \cdot p_0 \cdot r^2} \quad (2)$$

- для пластического контакта.

Предложенные формулы для определения коэффициентов трения материалов, работающих в вакууме в зависимости от разрежения окружающей среды для случаев упругого и пластического контакта необходимы при проектировании высоконадёжного вакуумного оборудования электронного производства.

Окончательный выбор материалов пар трения следует производить после экспериментальной проверки полученных теоретических зависимостей. Для этих целей разработана сверхвысоковакуумная экспериментальная установка.

Установка состоит из вакуумной камеры, на фланцах которой размещены привод вращения с сильфонной герметизацией, со стабильно регулируемой частотой вращения вала и привод поступательного движения с сильфонной герметизацией, выполненный водоохлаждаемым. В торцах устройств монтируются исследуемые образцы. Один из образцов вращается, а другой, перемещаясь поступательно, создает осевое нагружение, осуществляемое на атмосфере с помощью грузов. Для

измерения температуры в зоне трения размещены две термопары, сигналы с которых поступают на потенциометры ПП-63. Система откачки включает механический насос НВР-16Д и турбомолекулярный насос 01АБ1500 со скоростью откачки 750 л/с.

Установка позволяет исследовать фрикционные характеристики материалов и твердосмазочных покрытий приводов вакуумного оборудования.

По экспериментальным данным коэффициент трения определяется из выражения [1]

$$f = \frac{\eta (J_{пол.} \cdot u_{пол.} - J_{ХХ} \cdot u_{ХХ})}{T_1 \cdot \pi \cdot n_1 (R_{min} + R_{max})},$$

где η – коэффициент полезного действия электродвигателя; $J_{пол.}$ – величина тока при работе электродвигателя под нагрузкой; $u_{пол.}$ – напряжение, потребляемое электродвигателем во время работы под нагрузкой; $J_{ХХ}$ – величина тока при работе электродвигателя на холостом ходу; $u_{ХХ}$ – напряжение, потребляемое двигателем на холостом ходу; T_1 – нагрузка; n_1 – частота вращения; R_{max} , R_{min} – соответственно максимальный и минимальный радиусы элементов узла трения.

Температура поверхностей трения определяется по тарировочному графику через зависимости вида:

$$\begin{aligned} t_{нов.} &= F(t_1, P); \\ t_{нов.} &= F(t_2, P), \end{aligned}$$

где t_1, t_2 – температура в двух точках устройства осевого нагружения; P – разрежение в вакуумной камере.

Необходимыми данными для проектирования элементов передач и опорных узлов вакуумного оборудования являются данные по величине интенсивности изнашивания.

Контактирующие поверхности реального механизма никогда не бывают совершенно гладкими и поэтому в действительности реакции на контактирующих поверхностях не являются нормальными.

Поверхности узлов трения защищены сорбированными и окисными слоями. В атмосфере слои, изношенные в процессе трения, практически мгновенно восстанавливаются. В вакууме же для их восстановления требуется время, поэтому вероятность схватывания возрастает.

Рассмотрим узел трения, состоящий из двух деталей, которые перемещаются относительно друг друга в вакууме. На поверхностях трения удерживается окисный слой с энергией удержания, равной $2e$.

Одна деталь вращается и находится в контакте с другой, создающей осевое нагружение. Площадь контакта составляет

$$S = C_{cp} \cdot l,$$

где C_{cp} – длина поверхности трения для кольца; l – ширина контактной зоны.

Касательное напряжение между деталями узла трения

$$\tau = f \cdot \frac{T_1}{S}, \quad (3)$$

где f – коэффициент трения; T_1 – нагрузка.

Работа трения определяется

$$A = 2 \int_0^{C_{cp}} y \cdot l \cdot \tau dy = C_{cp}^2 \cdot l \cdot \tau = C_{cp} \cdot S \cdot \tau.$$

Поскольку в вакууме отсутствует конвективный теплообмен и, в предположении, отсутствие потерь в результате теплопроводности, запишем с учетом (3)

$$C_{cp.} \cdot S \frac{f \cdot T_1}{S} = 2eS,$$

откуда

$$T_1 = T_{1max} = 2 \frac{el}{f}$$

Здесь T_{1max} – максимальная нагрузка, при которой поверхностные слои изнашиваются сразу и схватывание происходит за один оборот.

Если действующая нагрузка меньше T_{1max} то схватывание произойдет, но после определенного количества циклов N .

Для полного износа поверхностных слоев с площади контакта необходимо затратить энергию

$$N C_{cp.} f \sigma_H = e S, \quad (4)$$

где σ_H – среднее контактное напряжение по Герцу.

Из формулы (4) число циклов работы узла трения в вакууме до схватывания равно:

$$N = \frac{e}{f C_{cp.} \sigma_H}$$

На площадках контакта происходит два вида изнашивания – деформационное и адгезионное.

Суммарное изнашивание равно:

$$J_{\Sigma} = J_{def.} + J_{адг.} \quad (5)$$

Интенсивность линейного изнашивания J_h определяется как средняя толщина изношенного слоя поверхности материала Δh , удаленная с единицы пути трения L :

$$J_h = \Delta h / L$$

Фактически материал удаляется лишь с реальных пятен касания, поэтому вводится понятие удельной интенсивности изнашивания i_h , величина которой выражается зависимостью [9]:

$$i_h = \Delta h_1 / l,$$

где Δh_1 – средняя толщина изношенного слоя пятна контакта; l – путь трения, равный диаметру пятна контакта.

При условии, что изнашивание идет равномерно во времени и по поверхности, установившийся процесс отделения материала на всем пути трения равен средней интенсивности изнашивания за одно нарушение фрикционной связи

$$J_h = i_h \cdot \frac{A_{\phi}}{A_H}, \quad (6)$$

где A_{ϕ} – фактическая площадь контакта; A_H – номинальная площадь контакта.

При деформационном изнашивании принимаем, что за одно фрикционное взаимодействие происходит удаление слоя $\Delta h_1 / N_1$, где N_1 – количество циклов деформации до разрушения.

Если напряжение в контакте превышает допустимое, то согласно работе [10] количество циклов деформации до разрушения будет определяться:

$$N_1 = 10^7 \left(\frac{\sigma_{HP}}{\sigma_{экр}} \right)^6,$$

где σ_{HP} – допускаемое контактное напряжение; $\sigma_{экр}$ – эквивалентное контактное напряжение.

$$\sigma_{экр} = \sigma_n \sqrt{1 + 4f^2},$$

где σ_n – контактное напряжение в зоне контактирования двух микронеровностей.

$$\sigma_i = 1,5 \frac{T}{\pi b} = 6 \frac{r^2}{\pi b},$$

f – коэффициент трения, определяемый по формулам (1) и (2).

Введя параметры T и t , и с учетом выражений (5) и (6) интенсивность деформационного и адгезионного изнашиваний будет определяться выражениями:

$$J_{\text{деф.}} = i_{\text{деф.}} \frac{A_{\text{адс.}}}{A_H} = K i_{\text{деф.}} \frac{A_6}{A_H};$$

$$J_{\text{адз.}} = i_{\text{адз.}} \frac{A_{\text{юв.}}}{A_H} = (1-K) i_{\text{адз.}} \frac{A_6}{A_H},$$

откуда

$$J_{\Sigma} = J_{\text{деф.}} + J_{\text{адз.}} = [K \cdot i_{\text{деф.}} + (1-K) i_{\text{адз.}}] \cdot \frac{A_6}{A_H},$$

где

$$i_{\text{деф.}} = \frac{R - \sqrt{R^2 - b^2}}{2bN};$$

$$i_{\text{адз.}} = \frac{R - \sqrt{R^2 - b^2}}{2b},$$

Окончательно

$$J_{\text{деф.}} = K \frac{R - \sqrt{R^2 - b^2}}{2Nb} \cdot \frac{A_6}{A_H}; \quad (7)$$

$$J_{\text{адз.}} = (1-K) \frac{R - \sqrt{R^2 - b^2}}{2Nb} \cdot \frac{A_6}{A_H}, \quad (8)$$

где b – ширина пятна контакта;

$$b = 1,4 \sqrt[3]{R^2 h_2 p_0 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}$$

– при упругом контакте

$$b = 0,618 \sqrt{p_0 h_2 \frac{R}{H_{\mu}}}, \text{ при } R \gg R_{\text{max}},$$

или

$$b = 0,437 \sqrt{p_0 h_2 \frac{2R - h_2}{H_{\mu}}}, \text{ при } R > R_{\text{max}}$$

– при пластическом контакте.

Здесь E_1, E_2 – модули упругости контактирующих материалов; R, h_2 – параметры шероховатости; p_0 – удельное давление в контакте; H_{μ} – микротвёрдость;

Полученные выражения (7) и (8) позволяют рассчитывать интенсивность изнашивания любых пар трения вакуумного оборудования в зависимости от нагрузки, микрогеометрии, скорости скольжения, остаточного давления в вакуумной камере и их механических характеристик.

Результаты проведённых исследований используются в процессе проектирования экологически совершенного вакуумного оборудования электронного производства для обеспечения надёжности его функционирования, в том числе:

- при составлении требований и определении параметров надёжности функциональных систем и оборудования на их основе;
- при количественном определении параметров материала, формы и нагрузки на узлы трения оборудования (размеров, оптимальных материалов и твёрдосмазочных покрытий);
- при проведении функционального анализа основных структур функциональных систем и всего оборудования в целом, с сопоставлением возможных вариантов;
- при проведении анализа трибоэкологических параметров (определении типа трения и износа, анализе граничного состояния с учётом параметров узлов трения оборудования);
- при оценке работоспособности элементов конструкций на основе параметров и моделей для обеспечения надёжности и экологического совершенства современного вакуумного оборудования электронного производства.

Литература

1. Степанчиков С.В. Исследование работоспособности узлов трения автоматических вакуумных манипуляторов. – В кн. Автоматические манипуляторы и металлообрабатывающее оборудование с программным управлением. Тула: ТПИ, 1986. С. 106-110.
2. Александрова А.Т., Васин В.А., Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. Вакуумная механика в электронном машиностроении: Монография. М.: МИЭМ, 2009, 145 с.
3. Курманалиев Т.И., Некрасов М.И., Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. Определение коэффициентов трения материалов НКА, работающей в вакууме. В кн. Конструирование научных космических приборов М.: Наука, 1985, С. 106-110.
4. Боуден Ф., Тейбор Д. Трение и смазка твёрдых тел. М.: Машиностроение, 1968, 544 с.
5. Карапетян С.С. Адгезионная модель трения. ДАН СССР, Машиностроение, 1968, 544 с.
6. Трение изнашивание и смазка: Справочник в двух книгах. Кн. 1. М.: Машиностроение, 1978, 398 с.
7. Тимошенко С.П. Справочник материалов Ч.2. Л.-М.: ГТИИ, 1938, 340 с.
8. Гельман А.С. Основы сварки давлением. М.: Машиностроение, 1970, 312 с.
9. Крагельский И.В. и др. Трение и износ в вакууме. М.: Машиностроение, 1973, 216 с.
10. Решетов Д.Н. Детали машин. М.: Машиностроение, 1989, 496 с.

Vasin V. A., Ivashov E. N., Kuznetsov P. S., Stepanchikov S. V.

CALCULATION OF TRIBOLOGICAL ENVIRONMENTAL PARAMETERS DRIVES VACUUM ELECTRONICS

The methods of calculating the tribological environmental parameters that affect the amounts of pollution Integral vacuum and the defects introduced by on processed products of electronic equipment. The calculation of coefficients of friction materials, working in a vacuum, depending on the dilution of the environment, for the cases of elastic and plastic contact interaction, as well as the calculation of the wear rate of friction depending on the workload, microgeometry contact, sliding velocity, the residual pressure in the vacuum chamber and mechanical characteristics of materials used in an environmentally perfect drives.

Keywords: wear rate, coefficient of friction, microparticles wear, introduced by the defects, ecologically perfect drive, vacuum equipment.