

scribed. Problems in promotion of technologies of recovery of coal methane in Russia are described. Under the developed concept the gradual legislative interdiction on development of coal seams with a content of methane more than 9 normal cubic meter on ton without its preliminary removal is offered.

Keywords: coal mine methane, resources, recovery and use of methane, the concept of progress of the coal industry.

Сластунов Сергей Викторович, профессор, заведующий кафедрой "Инженерная защита окружающей среды".

Тел. (499) 230-27-49. E-mail: svv@msmu.ru

Каркашадзе Георгий Григорович, профессор кафедры "Физика горных пород и процессов".

Тел. (499) 230-27-49. E-mail: karkash@msmu.ru

Коликов Константин Сергеевич, профессор кафедры "Инженерная защита окружающей среды".

Тел. (499) 230-27-49. E-mail: kolikovks@mail.ru

УДК 621.002.3:62-419

Твердосмазочные покрытия для улучшения экологии вакуумной технологической среды в электронном производстве

В. А. ВАСИН, канд. техн. наук; *Е. Н. ИВАШОВ*, д-р техн. наук;

С. В. СТЕПАНЧИКОВ, канд. техн. наук

Московский государственный институт электроники и математики (технический университет),
Москва, Россия

Предложены твердосмазочные покрытия, предназначенные для улучшения экологических параметров вакуумного оборудования электронного производства. Представлены результаты экспериментальных исследований фрикционных характеристик твердосмазочных покрытий. Разработаны конструктивно-технологические решения опорных узлов механических систем, позволяющие улучшить экологию вакуумной технологической среды.

Ключевые слова: экология вакуумной технологической среды, электронное производство, твердосмазочные покрытия, модели поверхностей трения, интенсивность изнашивания, газопоглотитель.

Многообразие технологических процессов электронного производства, в основе которых лежат сложные физико-химические, электрофизические, термические и другие процессы, осуществляемые в контролируемой вакуумной среде, требует применения оборудования, в котором цикл обработки изделия в значительной степени или полностью совершался бы автоматически, с использованием механических систем.

Работа механических систем в вакууме связана с введением в технологический объем пар трения, в которых кинематика относительного движения трущихся поверхностей обуславливает наличие в них либо пар трения покоя или скольжения, либо трения качения с проскальзыванием, являющихся источниками загрязнений технологической среды микрочастицами износа.

Для снижения трения и износа в элементах механических систем в условиях вакуума целесообразно использовать твердосмазочные композиционные покрытия, в которых в качестве связующего вещества используется эпоксидная смола в сочетании с твердой смазкой, например, дисульфидом молибдена или графитом и газопоглотителем, например, цеолитом, силикагелем или алюмогелем [1]. Такое покрытие наносится на втулку подшипника скольжения или другие трущиеся детали. При этом остаточные в вакуумной системе газы адсорбируются газопоглотителем на поверхностях трения и образуют плотную пленку из адсорбированных молекул, которая снижает адгезионное взаимодействие и в сочетании с твердой смазкой уменьшает коэффициент трения и изнашивание поверхностей, улучшая тем самым экологию технологической среды.

На рис. 1 представлены зависимости интенсивности изнашивания твердосмазочных композиционных покрытий, содержащих газопоглотитель — цеолит (CaA) и различные компоненты — графит (С) или дисульфид молибдена (MoS_2), связанные эпоксидной смолой (ЭС), от времени.

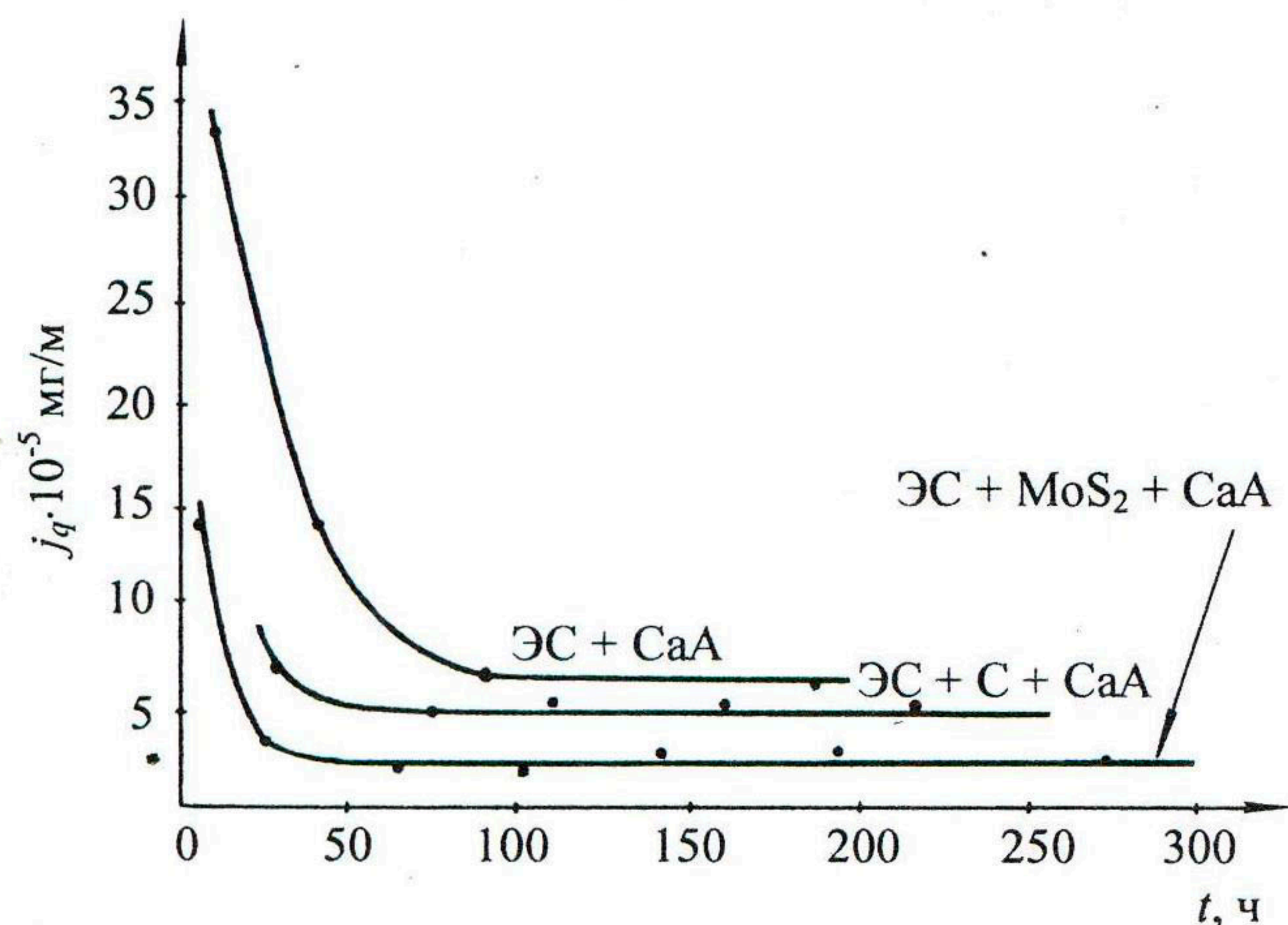


Рис. 1. Зависимости интенсивности изнашивания различных твердосмазочных композиционных покрытий на основе газопоглотителя цеолит с различными компонентами от времени

Здесь интенсивность изнашивания определяется через интенсивность линейного изнашивания J_h :

$$J_q = \rho S J_h,$$

где ρ — плотность изнашиваемого материала;
 S — площадь трения.

Интенсивность изнашивания покрытий на основе газопоглотителя силикагель (КСМ-6) с различными компонентами показана на рис. 2. На рис. 3 приведены зависимости коэффициентов трения предлагаемых покрытий от разрежения в вакуумной камере. Эксперименты проводились с подшипниками скольжения, на втулки которых наносились твердосмазочные покрытия.

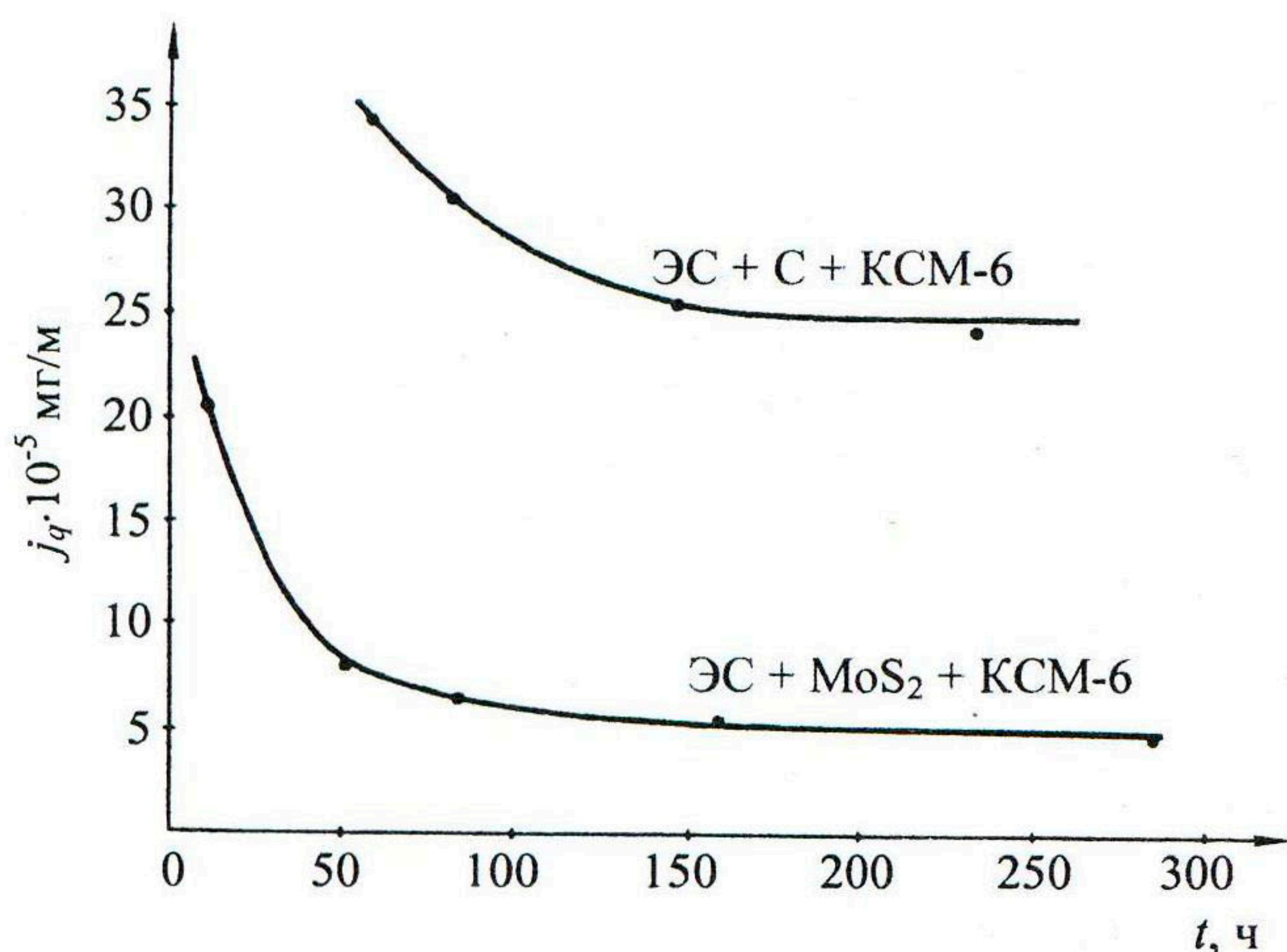


Рис. 2. Зависимости интенсивности изнашивания твердосмазочных композиционных покрытий на основе газопоглотителя силикагель (КСМ-6) с различными компонентами от времени

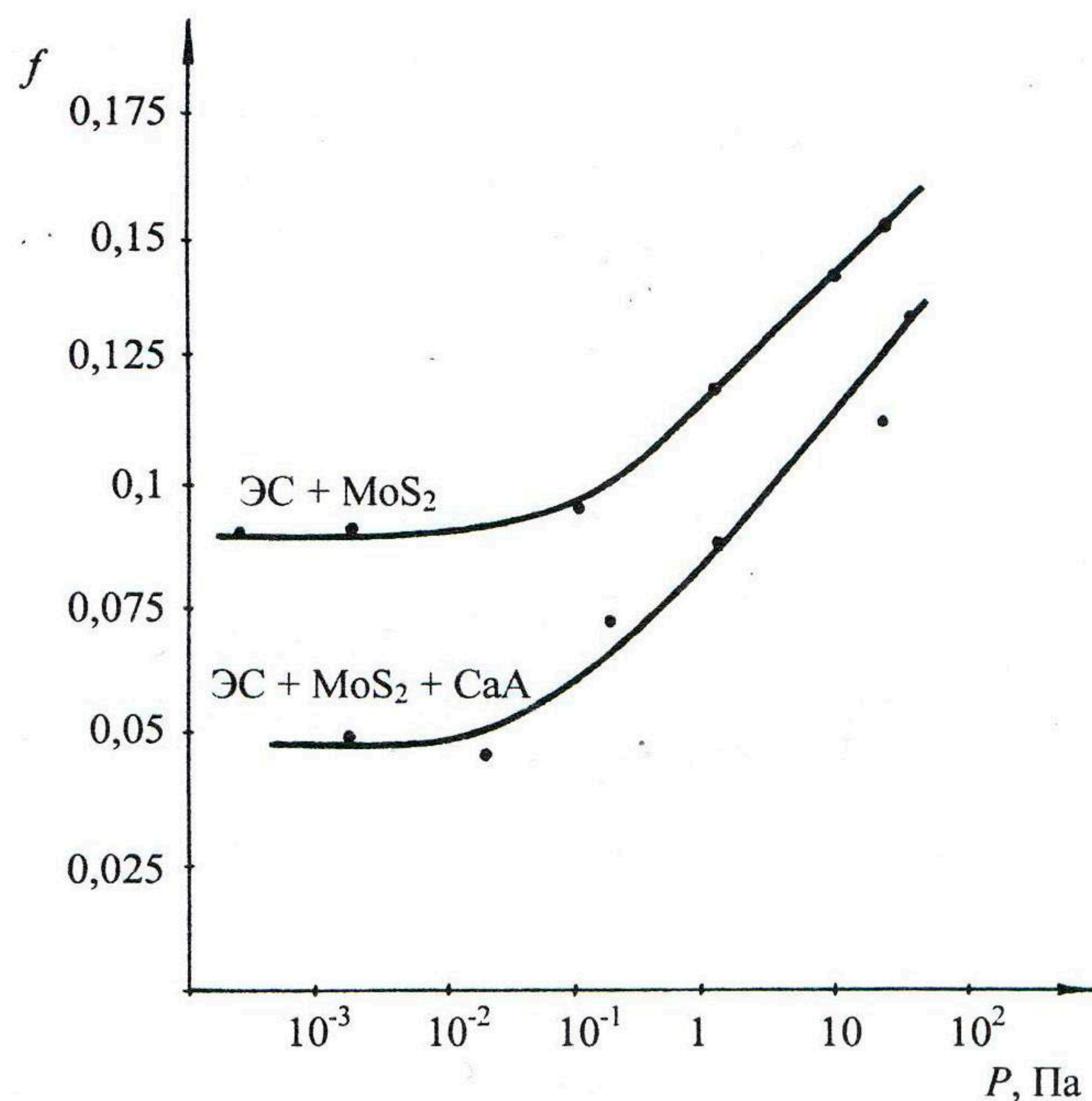


Рис. 3. Зависимости коэффициентов трения твердосмазочных композиционных покрытий от разрежения в вакуумной камере

Одним из основных требований, предъявляемых к подшипникам скольжения элементов механических систем, является обеспечение заданной точности. В связи с этим необходимо, чтобы изнашивание цапфы или втулки за определенный промежуток времени и для конкретных условий эксплуатации не выходило за пределы допустимых значений, лимитирующих надежность подшипника скольжения по точности.

Оценка интенсивности изнашивания производится в зависимости от механических свойств материалов цапфы и втулки, микрогеометрии контактирующих поверхностей и удельного давления в контакте.

Величина максимального удельного давления в контакте определяется:

$$P_0 = P / 2R_c \ell,$$

где P — радиальная нагрузка на опору;

R_c — радиус цапфы;

ℓ — длина цапфы.

При оценке интенсивности изнашивания приняты следующие допущения.

1. Поверхность трения моделируется сферическими сегментами высотой R_{\max} и радиусом R . Поверхности трения могут быть смоделированы в виде сферы, цилиндра или конуса (рис. 4, а—в) [2]. Наиболее пригодной для расчетов на трение и изнашивание и предпочтительной является сферическая модель, которая обладает осевой симметрией, что особенно важно при рассмотрении проблемы с учетом кинематики. При сферической модели осевая симметрия отражает изотропность трения. Две другие формы способны описать анизотропные эффекты. В этих формах нормальные напряжения на периферии (см. рис. 4, б) и в центре (см. рис. 4, в) пятна контакта являются неопределенными.

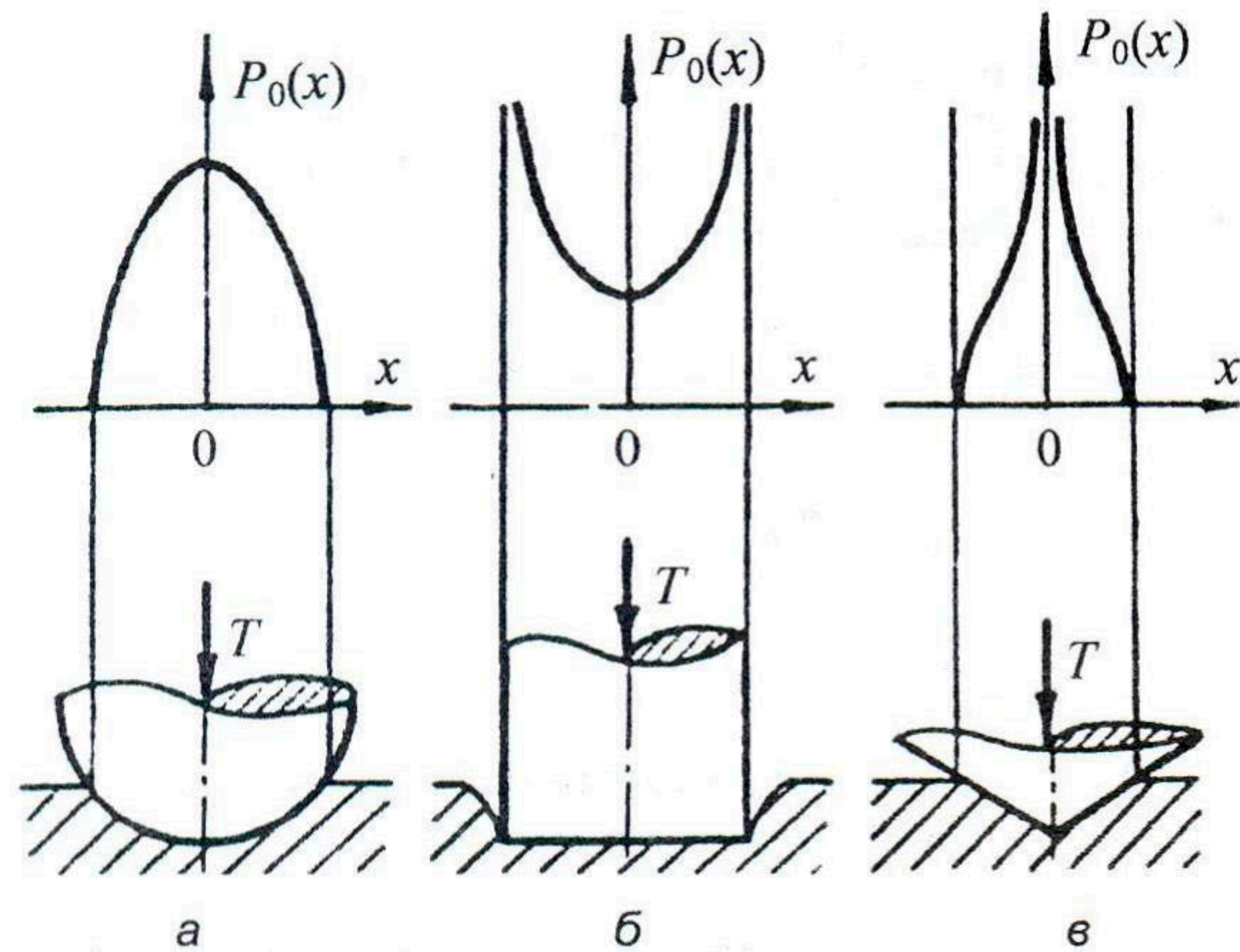


Рис. 4. Модели поверхностей трения

Однако сферическая модель, где микронеровности моделируются в виде полусфер, не всегда отражает картину реальной шероховатости. Поэтому моделируем поверхность трения в виде сферических сегментов, форма которых близка к форме реальной поверхности.

2. Износ происходит в зоне вершин микронеровностей.

3. Влияние температуры в зоне трения учитывается изменениями механических свойств материалов.

4. Адгезионные свойства и физико-химические изменения поверхностных слоев не учитываются.

Интенсивность линейного изнашивания J_h определяется как средняя толщина изношенного слоя поверхности материала Δh , удаленная с единицы пути трения L [3]:

$$J_h = \Delta h / L.$$

Фактически материал удаляется лишь с реальных пятен контакта, поэтому вводится понятие удельной интенсивности изнашивания i_h , величина которой выражается зависимостью

$$i_h = \Delta h_1 / \ell, \tag{1}$$

где Δh_1 — средняя толщина изношенного слоя контакта;

ℓ — путь трения, равный диаметру пятна контакта.

Между интенсивностью изнашивания J_h и удельной интенсивностью изнашивания i_h существует следующая связь:

$$J_h = i_h \frac{A_a}{A_R}, \tag{2}$$

где A_a — фактическая площадь контакта;

A_R — номинальная площадь контакта.

Средняя толщина изношенного слоя шероховатой поверхности за одно нарушение фрикционной связи определяется:

$$\Delta h_1 = \frac{R - \sqrt{R^2 - a^2}}{N}, \tag{3}$$

где R — радиус единичной микронеровности, смоделированной в виде сферического сегмента;

a — радиус единичного пятна контакта;

N — количество циклов деформации до разрушения.

Радиус основания сегмента при $R_{max} \ll R$ будет равен

$$r \approx \sqrt{2RR_{max}}, \tag{4}$$

где R_{max} — максимальная высота микронеровностей.

Расстояние между микровыступами двух шероховатостей равно $2r$.

Тогда сила, действующая на единичную микронеровность, равна

$$T = 4P_0 r^2. \tag{5}$$

Радиус пятна контакта определяется:

$$a = 0,883 \sqrt{\frac{T}{2} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) R}, \tag{6}$$

где T — сила, действующая на единичную микронеровность;

E_1, E_2 — модули упругости материала цапфы и втулки;

R — радиус единичной микронеровности, смоделированной в виде сферического сегмента.

После подстановки выражений (4) и (5) в (6) получим для случая упругого контактного взаимодействия

$$a = 1,43 \sqrt{R^2 R_{max} P_0 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}. \tag{7}$$

Для случая пластического контактного взаимодействия радиус пятна контакта находится из условия, что контактные напряжения σ_k на превышают $10 H_\mu$, т. е.

$$\sigma_k = 10 H_\mu \tag{8}$$

или

$$\frac{1,5T}{a} = 10 H_\mu.$$

Откуда, используя выражения (4) и (5), получим

$$a = 0,618 \sqrt{\frac{R_0 R_{max} R}{H_\mu}}. \tag{9}$$

Максимальное удельное давление, назовем его допусковым удельным давлением $[P_0]$, при котором еще выполняются соотношения (6), будет определяться из следующих соображений.

Наибольшее контактное напряжение возникает в центре круга касания двух микронеровностей и определяется:

$$\sigma_k = \frac{2P_0 P_{max}}{\sqrt[3]{RR_{max}^2 P_0^2 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^2}}.$$

Откуда с учетом выражения (8)

$$[P_0] = \frac{125 H_\mu R}{R_{max}} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right).$$

Интенсивность линейного изнашивания с учетом выражений (1)—(3) равна

$$J_h = \frac{R - \sqrt{R^2 - a^2}}{2aN} \cdot \frac{A_a}{A_R}, \quad (10)$$

где a — радиус пятна контакта.

$$A_a = \pi a^2; \quad (11)$$

$$A_R = \pi r^2. \quad (12)$$

Количество циклов деформации N , приводящих к разрушению, зависит от напряженного состояния единичного пятна контакта. Если напряжение в контакте превышает допустимое, то количество циклов деформации до разрушения будет определяться [2]:

$$N = 10^7 \left(\frac{[\sigma_k]}{\sigma_k} \right)^6. \quad (13)$$

Расчетные контактные напряжения следует определять по формулам (7) или (9) в зависимости от характера контактного взаимодействия.

Подставив выражения (11)—(13) в формулу (10), получим

$$J_h = \frac{(R - \sqrt{R^2 - a^2})a}{2 \cdot 10^7 \left(\frac{[\sigma_k]}{\sigma_k} \right)^6 R^2}$$

или

$$J_h = 5 \cdot 10^{-8} \left(\frac{[\sigma_k]}{\sigma_k} \right)^{-6} \frac{a(R - \sqrt{R^2 - a^2})}{R^2}.$$

Предложенные и исследованные твердосмазочные покрытия позволяют создавать механические системы с пониженной интенсивностью изнашивания и уменьшать уровень загрязнений, приносимых элементами оборудования.

Повысить качество среды можно с помощью конструктивно-технологических решений опорных узлов механических систем.

Так, в качестве примера на рис. 5 представлена конструкция опоры скольжения для работы в экологически чистых вакуумных средах.

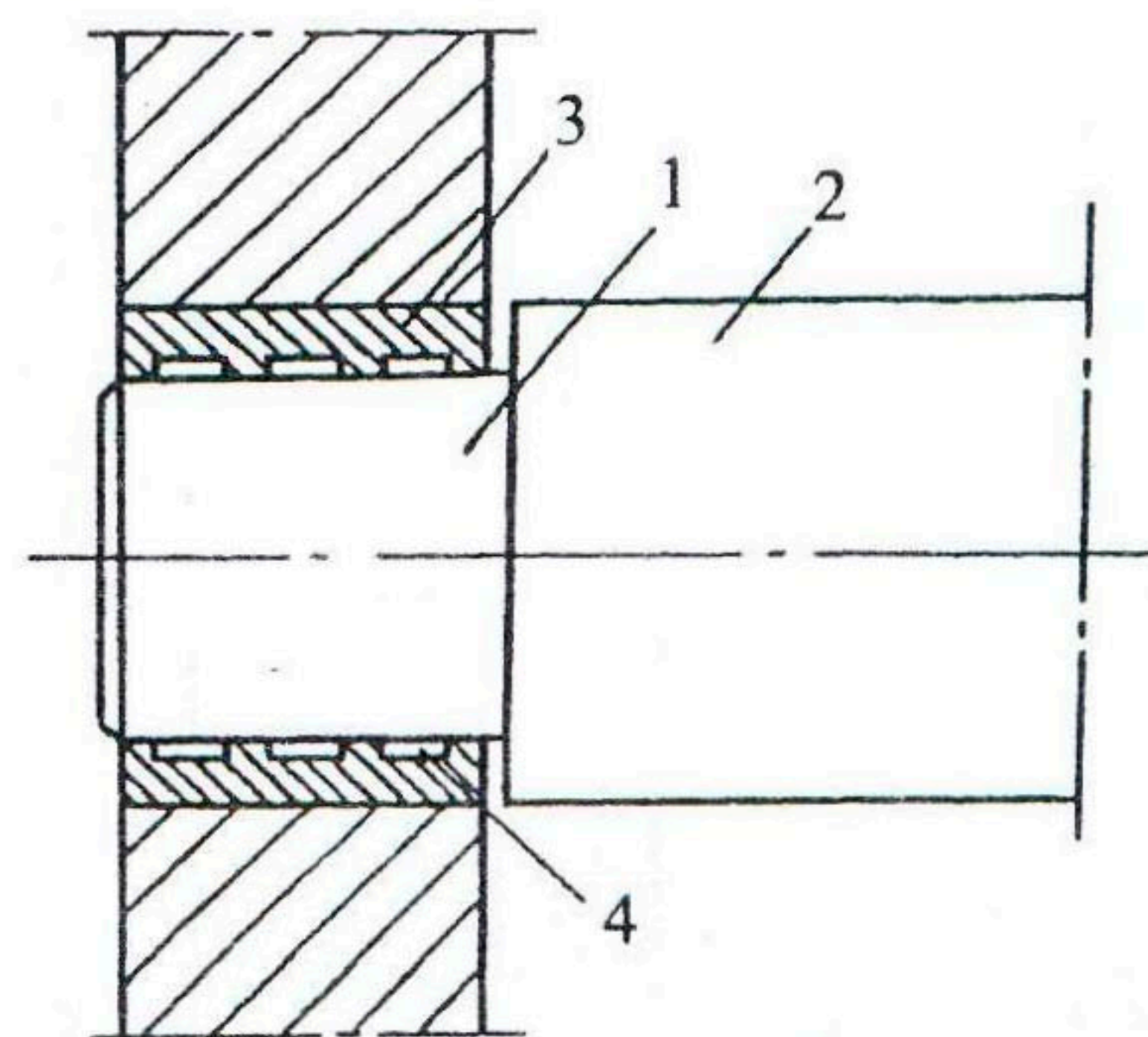


Рис. 5. Опора скольжения для работы в экологически чистых вакуумных средах

Опора содержит цапфу 1 вала 2, охватывающую ее втулку 3, внутренняя поверхность которой выполнена с концентрично расположенными кольцевыми канавками 4. Втулка выполнена из пьезоэлектрического материала с нанесенным твердосмазочным покрытием. В качестве пьезоэлектрического материала используется цирконат свинца (PbZrO_2) или титанат бария (BaTiO_2).

При вращении цапфы, например, при использовании опоры в передаточном механизме, при передаче крутящего момента на втулку действует радиальная нагрузка. Под действием этой нагрузки на пьезоэлектрической втулке возникает электрический заряд, что приводит к скапливанию микрочастиц износа в концентрично расположенных кольцевых канавках под действием электрических сил.

Средство улавливания микрочастиц износа также может быть выполнено в виде втулки из магнитострикционного материала, в котором под действием нагрузки возникает заряд и магнитное поле. В результате этого микрочастицы износа скапливаются в концентрично расположенных кольцевых канавках под действием магнитных сил. В качестве магнитострикционного материала могут быть использованы никель, ряд ферритов и некоторые редкоземельные элементы.

Таким образом, предлагаемые конструктивно-технологические решения позволяют не только снижать интенсивность изнашивания, но и локализовать образующиеся микрочастицы износа, улучшая тем самым экологию вакуумной технологической среды в электронном производстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ивашов Е. Н., Степанчиков С. В. Способ уменьшения трения в вакууме. Пат. 2014551 РФ от 15.06.94. Бюл. № 11.
2. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.
3. Крагельский И. В. и др. Трение и износ в вакууме. — М.: Машиностроение, 1973. — 216 с.
4. Плюснин А. К., Ерданов В. И., Пин Л. Г. Проектирование механических передач приборов. — М.: Высшая школа, 1987. — 340 с.