

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

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ВНУТРИКАМЕРНЫХ СИСТЕМ СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНОГО АНАЛИТИЧЕСКОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Рассмотрены вопросы повышения надёжности внутрикамерных систем сверхвысоковакуумного оборудования при использовании устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием. Представлены методика и результаты расчётов устройств на привносимые загрязнения микрочастицами износа, позволяющие свести к минимуму привносимые загрязнения, повысить надёжность внутрикамерных систем и оптимизировать параметры проектируемого сверхвысоковакуумного аналитического и технологического оборудования электронной техники.*

**Ключевые слова:** *сверхвысоковакуумное оборудование, внутрикамерные системы, бесконтактное магнитное взаимодействие, привносимые загрязнения,*

Большинство микроскопических характеристик поверхностей, используемых в производстве изделий электронной техники, таких как [1]: элементный состав, распределение химических элементов по глубине, кристаллогеометрическая структура дальнего и ближнего порядка, дефектность структуры, локальные магнитные характеристики, данные о тепловых колебаниях поверхности, взаимосвязаны и взаимообусловлены и определяются химической природой атомов. Решающее влияние на основные свойства поверхности оказывает ее электронное строение. В основе закономерностей, которым подчиняются многие явления на поверхности, лежат элементарные взаимодействия валентных электронов.

Определение основных микроскопических характеристик поверхности и контроль за их изменением в результате каких-либо воздействий осуществляется с помощью специальных аналитических методов, из которых наибольшее распространение получили методы электронной и ионной спектроскопии. Эти методы основываются на регистрации определенных изменений, происходящих в атомных слоях вещества в результате взаимодействия с зондом. Соответствующий пространственно-энергетический анализ возбужденных спектров и масс-спектров позволяет получить информацию практически о всех основных микроскопических характеристиках поверхности.

Процессы производства различных изделий электронной техники связаны с формированием поверхности. Физические свойства, например, кристаллической структуры (содержание в ней дефектов, характер распределения примесей) определяются условиями на поверхности при нанесении элементарных слоев [2].

При анализе поверхности активных материалов, не допускающих контакта с воздушной средой, а также при изучении явлений адсорбции в оборудовании могут встраиваться системы для нанесе-

ния адсорбата. Эти системы, а также системы для очистки поверхности анализируемых объектов можно вынести во вспомогательную камеру, соединённую с основной через загрузочное шлюзовое устройство. Для перемещения объектов из одной камеры в другую, юстировки поверхностей относительно первичных пучков и анализаторов вторичной эмиссии, смены образцов, перемещения их с позиции на позицию необходимо применение различных внутрикамерных механических систем – вводов движения в вакуум, вакуумных передающих и юстировочных манипуляторов, передаточных механизмов и др. Для быстрой смены объектов в камерах без нарушения вакуумных условий применяются загрузочные шлюзовые устройства.

Особенностью применения различных внутрикамерных механических систем в современном сверхвысоковакуумном оборудовании является обеспечение их надёжности и учёт привносимых загрязнений, генерируемых из узлов внешнего трения, так как сверхвысокий вакуум является агрессивной средой для любых работающих в нём механизмов.

Перспективным направлением развития внутрикамерных механических систем для сверхвысоковакуумного аналитического и технологического оборудования высоких технологий является создание устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием (УБМВ). Это позволяет снизить количество узлов трения – источников генерации загрязняющих микрочастиц износа и значительно повысить надёжность внутрикамерных систем. Источниками генерации загрязняющих микрочастиц износа в УБМВ остаются только опорные узлы. В опорных узлах УБМВ для передачи вращательного движения используются шарикоподшипники, а для передачи поступательного движения – шариковые направляющие. И те и другие являются источниками генерации загрязняющих микрочастиц износа.

Привносимые загрязнения, выделяемые из опорных узлов внутрикамерных механических систем, ведут к ухудшению условий обнаружения примесей, снижению пространственного разрешения – при аналитических операциях, снижению выхода годных изделий электронной техники – при проведении технологического процесса и уменьшению надёжности узлов трения при попадании загрязнений на дорожки качения шарикоподшипников и шариковых направляющих.

На рис.1. показан пример типовой сверхвысоковакуумной установки электронного Оже-спектрометра с послойным анализом.

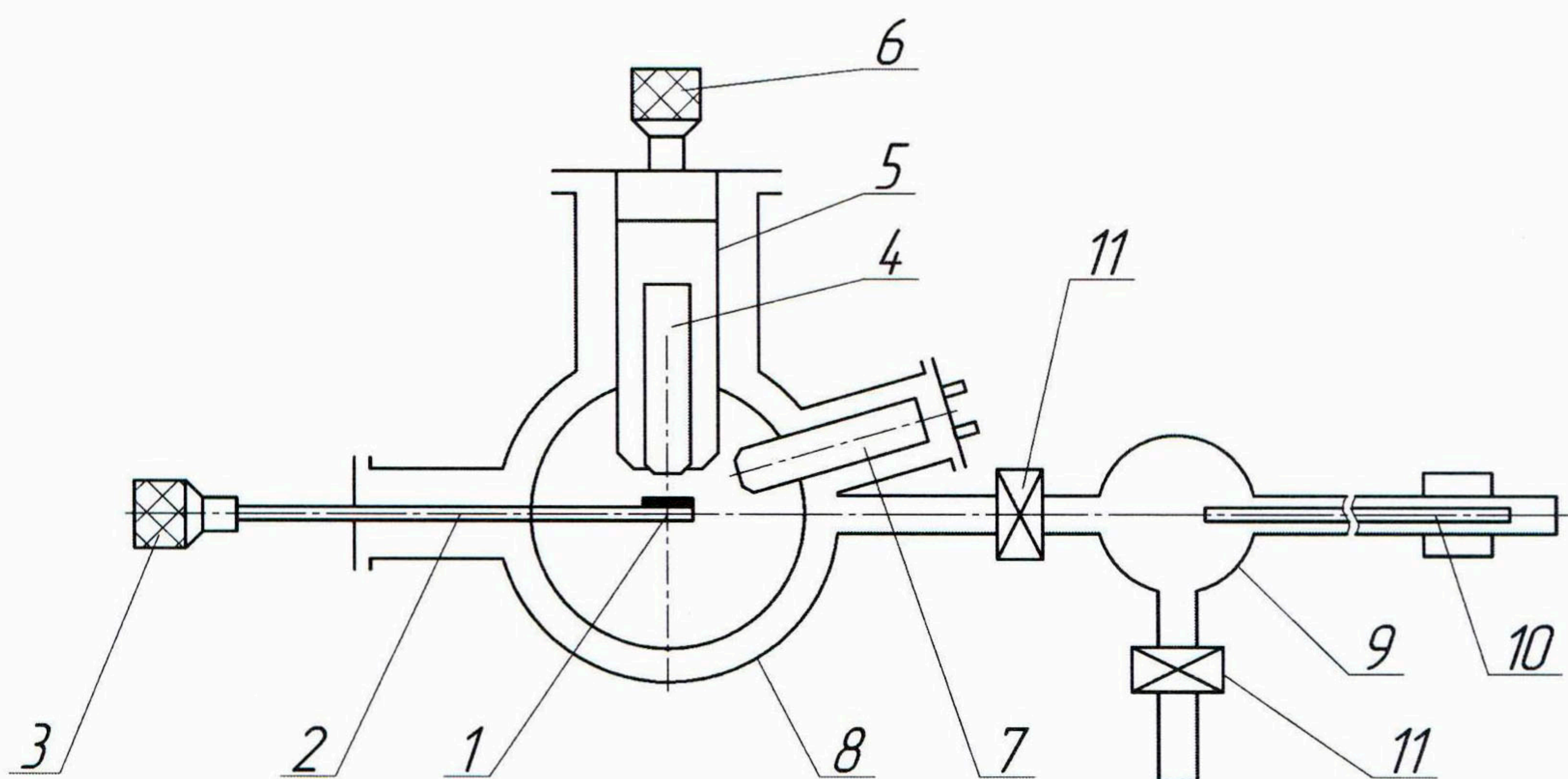


Рис.1. Сверхвысоковакуумный растровый электронный Оже-спектрометр с послойным анализом:

1 – исследуемый образец; 2 – шток манипулятора юстировки образца; 3 – юстировочный манипулятор на основе УБМВ вращательного движения; 4 – электронная пушка; 5 – энергетический анализатор; 6 – манипулятор регулирования относительного энергетического разрешения анализатора; 7 – ионная пушка; 8 – аналитическая камера; 9 – камера загрузки; 10 – манипулятор загрузки образцов на основе УБМВ поступательного движения; 11 – шиберные затворы

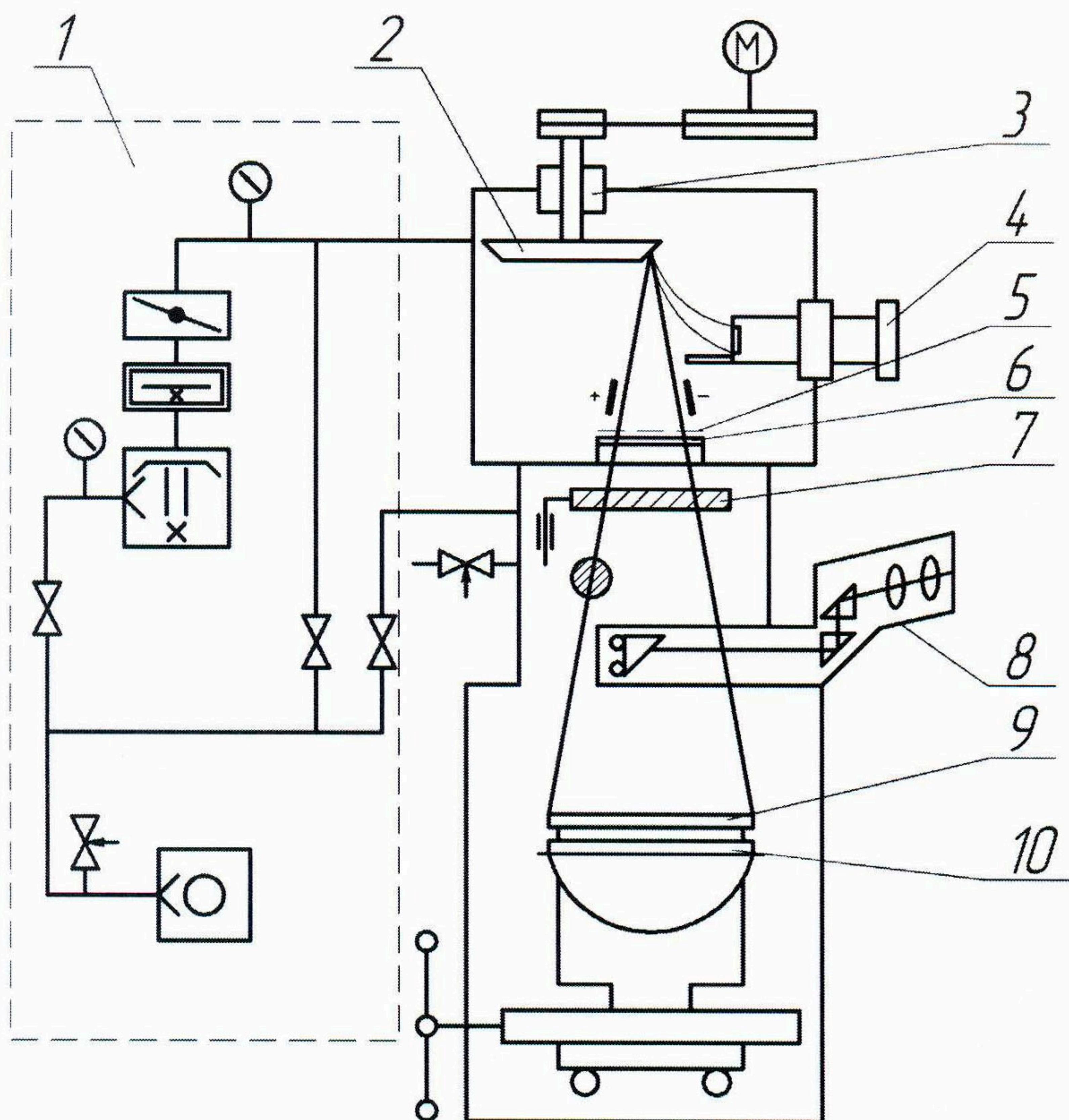


Рис.2. Вакуумно-кинематическая схема рентгенолитографической установки совмещения и экспонирования:  
1 – вакуумная система; 2 – анод; 3 – вакуумный ввод вращательного движения; 4 – электронно-оптическая система; 5 – сетка; 6 – мембрана; 7 – заслонка; 8 – микроскоп; 9 – рентгеношаблон; 10 – подложка

Схемы работы загрузочного шлюзового устройства для аналитических и технологических модулей сверхвысоковакуумных комплексов молекулярно-лучевой эпитаксии, приведены на рис. 3.

Загрузочное шлюзовое устройство содержит рабочую камеру 1, шиберные затворы 2, крышку люка 3, подложку 4, камеру загрузки 5, передающий манипулятор 6, вакуумный вентиль 7 и насос 8 [4]. Передающий манипулятор 6 выполнен на основе УБМВ с шариковой направляющей. Магнитная часть передающего манипулятора 6 выполнена с возможностью её отсоединения во время обезгаживающего высокотемпературного прогрева.

При работе передающего манипулятора на основе УБМВ генерация загрязняющих

Установка имеет в своем составе юстировочный манипулятор на основе УБМВ вращательного движения и манипулятор загрузки образцов на основе УБМВ поступательного движения.

При работе манипуляторов на основе УБМВ количество узлов внешнего трения и генерация загрязняющих микрочастиц износа сведена к минимуму, а количество и размеры микрочастиц, выделяемых из шарикоподшипников и шариковой направляющей, подсчитываются по приведенной в настоящей работе методике.

Вакуумно-кинематическая схема установки для рентгенолитографии представлена на рис.2.

Привод анода технологической установки должен надёжно работать с частотой вращения до 10000 об/мин, создавать минимальные вибрации и не загрязнять вакуумный объём микрочастицами износа [3]. Этому наиболее полно удовлетворяют приводы на основе УБМВ.

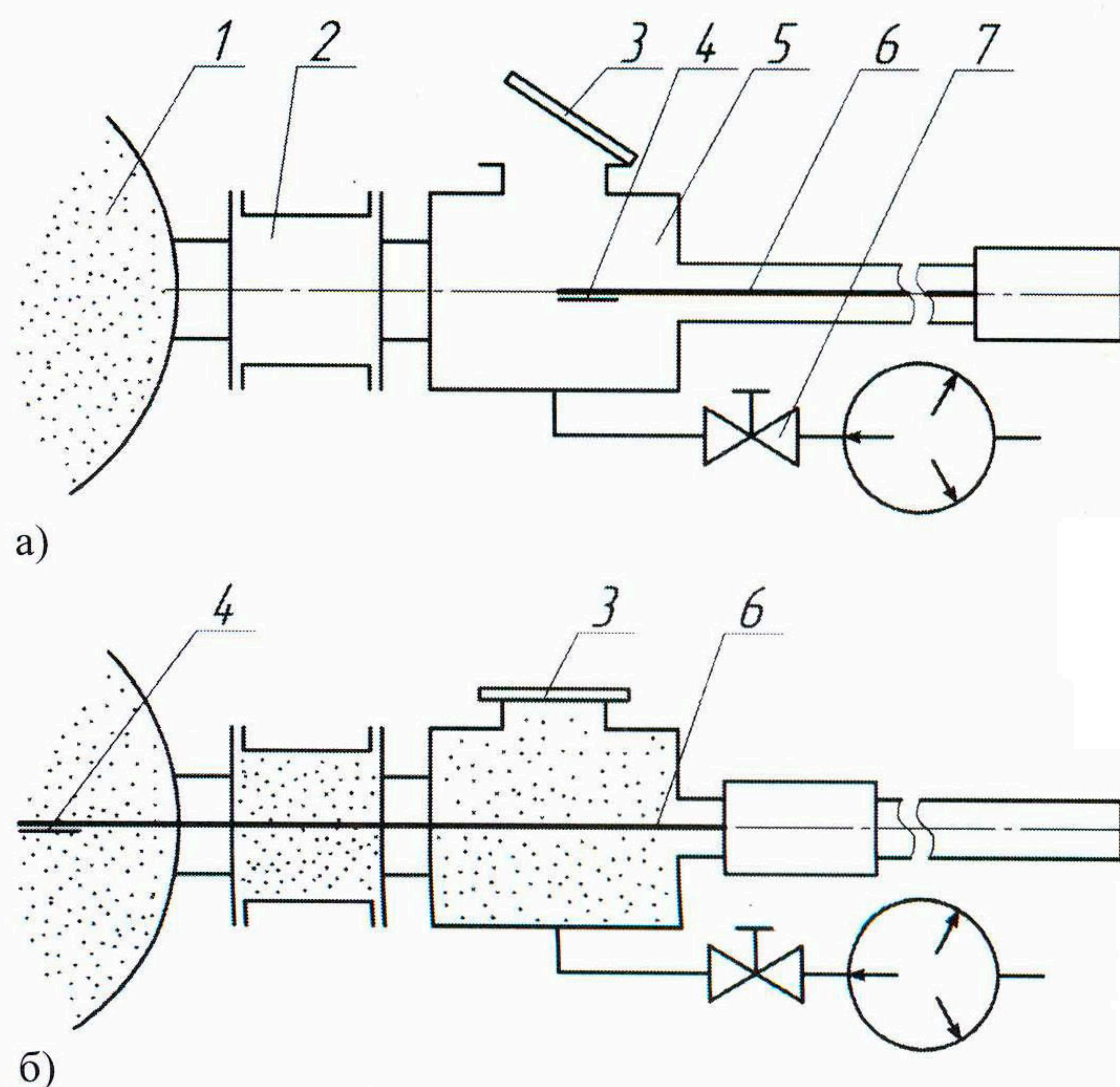


Рис.3. Схемы работы загрузочного шлюзового устройства для аналитических и технологических модулей:  
а – подача подложки в камеру загрузки;  
б – передача подложки в рабочую камеру

микрочастиц износа также сведена к минимуму, а количество и размеры микрочастиц могут быть рассчитаны.

При расчете количества и размеров микрочастиц износа, образовавшихся в результате работы опорных узлов УБМВ, принято, что изнашивание происходит в зоне вершин микронеровностей, а изнашиваемый материал удаляется лишь с реальных пятен контакта. При этом средний диаметр микрочастицы износа соответствует сферическому сегменту, радиус которого равен радиусу скругления микронеровностей, а высота равна толщине удаленного слоя шероховатой поверхности за одно контактное взаимодействие [5].

Среднее количество  $N$  (в 1/с) микрочастиц износа, образовавшихся в результате работы шарикоподшипника в единицу времени, определяется по формуле

$$N = \frac{I_h v_c S_H}{W},$$

где  $I_h$  – средняя линейная интенсивность изнашивания;  $v_c$  – скорость скольжения во фрикционном контакте шарик-сепаратор, мм/с;  $S_H$  – номинальная площадь поверхности трения, мм<sup>2</sup>;  $W$  – средний объем микрочастицы износа, мм<sup>3</sup>.

Средняя линейная интенсивность изнашивания

$$I_h = \frac{\pi}{8} 10^{-7} \left( \frac{\sigma_H \sqrt{1 + 4f^2}}{\sigma_{HP}} \right)^6 \frac{b(R - \sqrt{R^2 - b^2})}{R_{\max} (2R - R_{\max})},$$

где  $\sigma_H$ ,  $\sigma_{HP}$  – контактное и допускаемое контактное напряжения, Н/мм<sup>2</sup>;  $f$  – коэффициент трения;  $b$  – радиус фрикционного пятна контакта, мм;  $R$  – радиус скругления микронеровностей, мм;  $R_{\max}$  – максимальная высота микронеровностей, мм.

Контактные напряжения не должны превышать допускаемые:

$$\sigma_H = \frac{6p_k \cdot R_{\max} (2R - R_{\max})}{\pi b^2} \leq \sigma_{HP}, \quad (1)$$

где  $p_k$  – удельное давление в контакте, Н/мм<sup>2</sup>.

При упругом контактном взаимодействии радиус фрикционного пятна контакта

$$b = 0,7 \sqrt[3]{4p_k R R_{\max} (2R - R_{\max}) (1/E_1 + 1/E_2)},$$

где  $E_1$ ,  $E_2$  – модули упругости контактирующих материалов, Н/мм<sup>2</sup>.

Если условие (1) не выполняется, то радиус фрикционного пятна контакта определяется из условия пластического контактного взаимодействия:

$$b = 1,4 \sqrt{\frac{p_k R_{\max} (2R - R_{\max})}{HV}},$$

где  $HV$  – микротвердость менее твердого материала рассматриваемой пары.

При работе шарикоподшипника изнашивание происходит в основном при контактном взаимодействии шариков с сепаратором.

Определяем:

- силу, действующую на сепаратор со стороны шарика:

$$P_c = \frac{F_r (1 - \cos^{3/2} \gamma)}{1 + 2 \cos^{5/2} \gamma + 2 \cos^{5/2} 2\gamma + \dots + 2 \cos^{5/2} z\gamma}$$

(здесь  $F_r$  – радиальная нагрузка на шарикоподшипник, Н;  $\gamma$  – угол между соседними шариками в шарикоподшипнике;  $z$  – число шариков, расположенных ниже горизонтальной оси шарикоподшипника);

- удельное давление в контакте шарик – сепаратор:

$$p_k = P_c / D_w \cdot l_c$$

(здесь  $P_c$  – сила, действующая на сепаратор со стороны шарика, Н;  $D_w$  – диаметр шариков, мм;  $l_c$  – высота сепаратора, мм);

- скорость скольжения во фрикционном контакте шарик – сепаратор:

$$v_c = \frac{\pi n d_2}{60}$$

(здесь  $n$  – частота вращения вала, на котором установлен шарикоподшипник, об/мин;  $d_2$  – наружный диаметр внутреннего кольца шарикоподшипника, мм);

- номинальную площадь поверхности трения:

$$S_i = 2D_w l_c Z_w$$

(здесь  $Z_w$  – число шариков в шарикоподшипнике).

При работе шариковой направляющей изнашивание также, как и в шарикоподшипнике, происходит, в основном, при контактном взаимодействии шариков с сепаратором.

Определяем:

- силу, действующую на сепаратор со стороны шарика:

$$P_c = \frac{5}{Z_w} \cdot F_{rk}$$

(здесь  $Z_w$  – число шариков в направляющей;  $F_{rk}$  – радиальная нагрузка на каретку, Н);

- удельное давление в контакте шарик – сепаратор:

$$p_k = \frac{P_c}{D_w \cdot l_c}$$

(здесь  $D_w$  – диаметр шариков, мм;  $l_c$  – высота сепаратора, мм);

- скорость скольжения во фрикционном контакте шарик – сепаратор:

$$v_c = \frac{v_{ПК}}{2}$$

(здесь  $v_{ПК}$  – скорость перемещения каретки, мм/с);

- номинальную площадь поверхности трения:

$$S_i = 2D_w l_c Z_w.$$

Средний объем микрочастиц износа образовавшихся в результате работе опорных узлов УБМВ определяется по формуле:

$$W = \frac{\pi}{2} (R - \sqrt{R^2 - b^2}) \left[ b^2 + \frac{(R - \sqrt{R^2 - b^2})^2}{3} \right].$$

Минимальное количество загрязняющих микрочастиц износа, образовавшихся в результате работы шарикоподшипника в единицу времени, можно записать в виде

$$N_{\min} = \frac{Nd}{L_k},$$

где  $d = 2b$  – средний диаметр микрочастицы износа, мм;

$L_k$  – путь трения, мм.

Максимальные объем и диаметр микрочастиц износа определяется по формулам:

$$W_{\max} = \frac{WL_k}{d};$$

$$d_{\max} = \frac{\sqrt[3]{6WL_k}}{\pi d}.$$

Зависимости среднего количества  $N$  образующихся микрочастиц от скорости скольжения  $v_c$  во фрикционном контакте для пар: сталь 40X13 – сталь 40X13, сталь 45 – сталь 45, показаны на рис.4. При этом удельное давление в контакте  $p_k = 0,33 \text{ Н/мм}^2$ , вакуум  $p = 1 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$ .

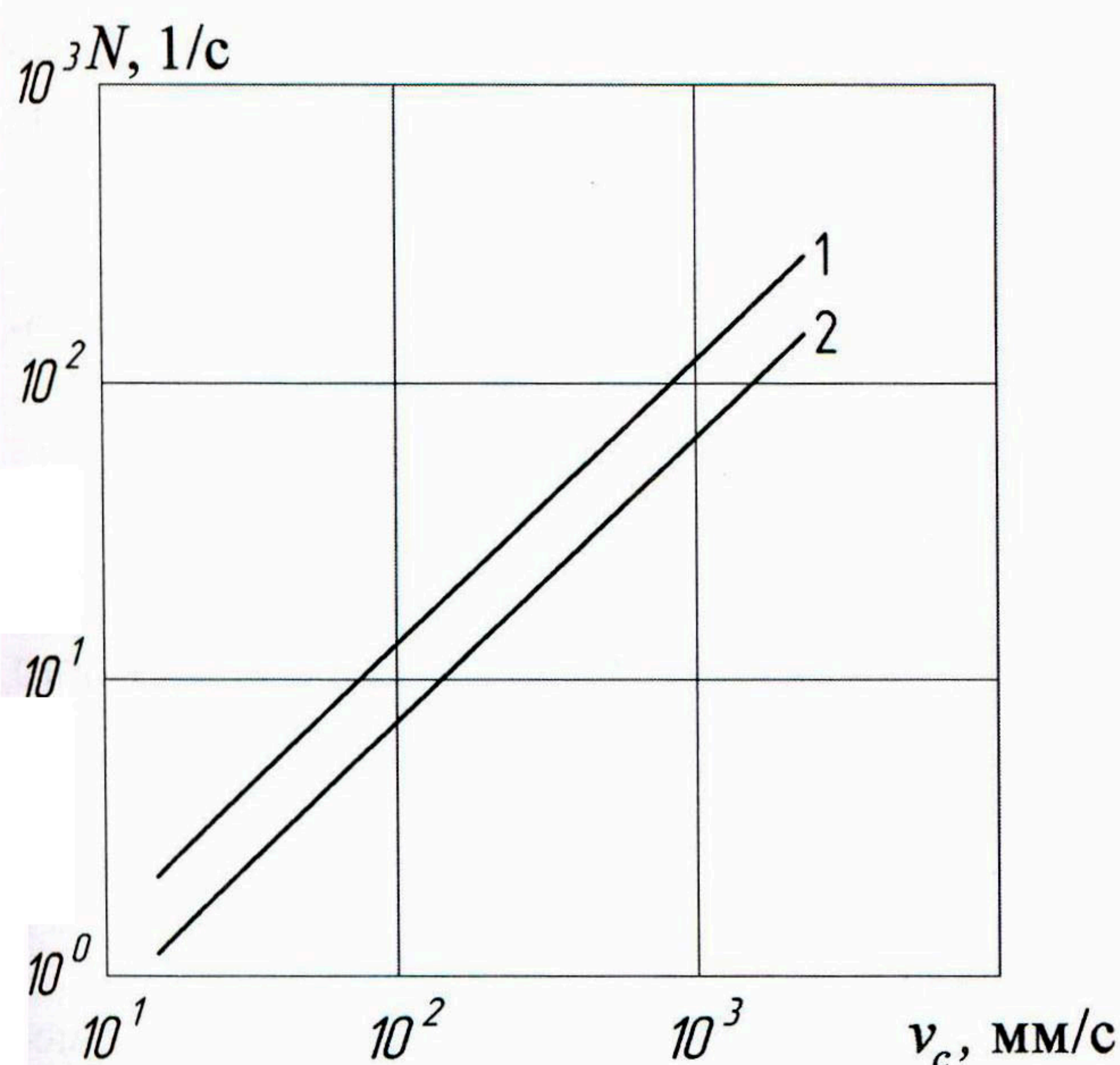


Рис.4. Зависимость среднего количества  $N$  образующихся микрочастиц от скорости скольжения  $v_c$  во фрикционном контакте для пар материалов:

- 1 – сталь 40X13 – сталь 40X13;
- 2 – сталь 45 – сталь 45

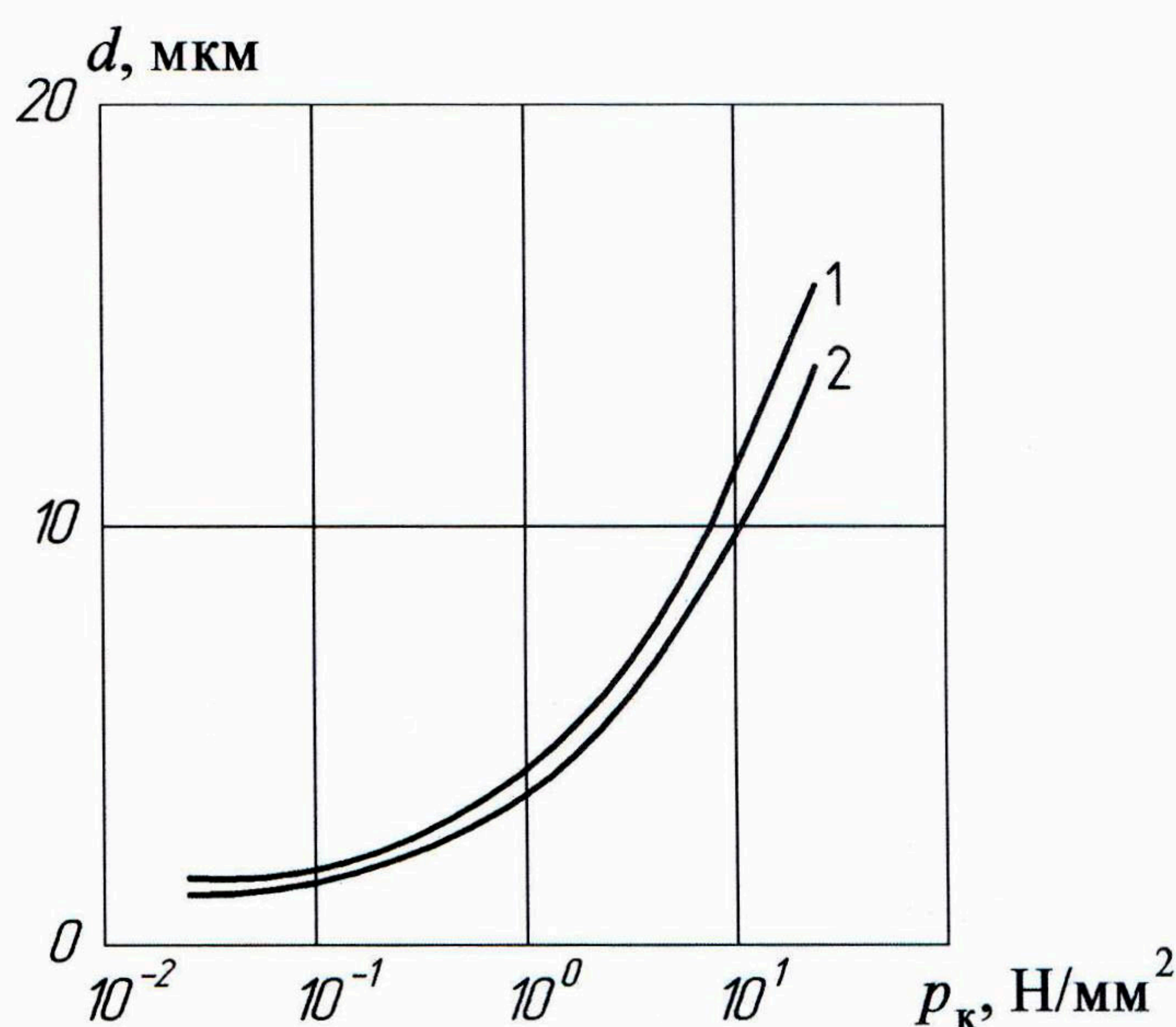


Рис.5. Зависимость среднего размера  $d$  образующихся микрочастиц от удельного давления в контакте  $p_k$  для пар материалов:

- 1 – сталь 40X13 – сталь 40X13;
- 2 – сталь 45 – сталь 45

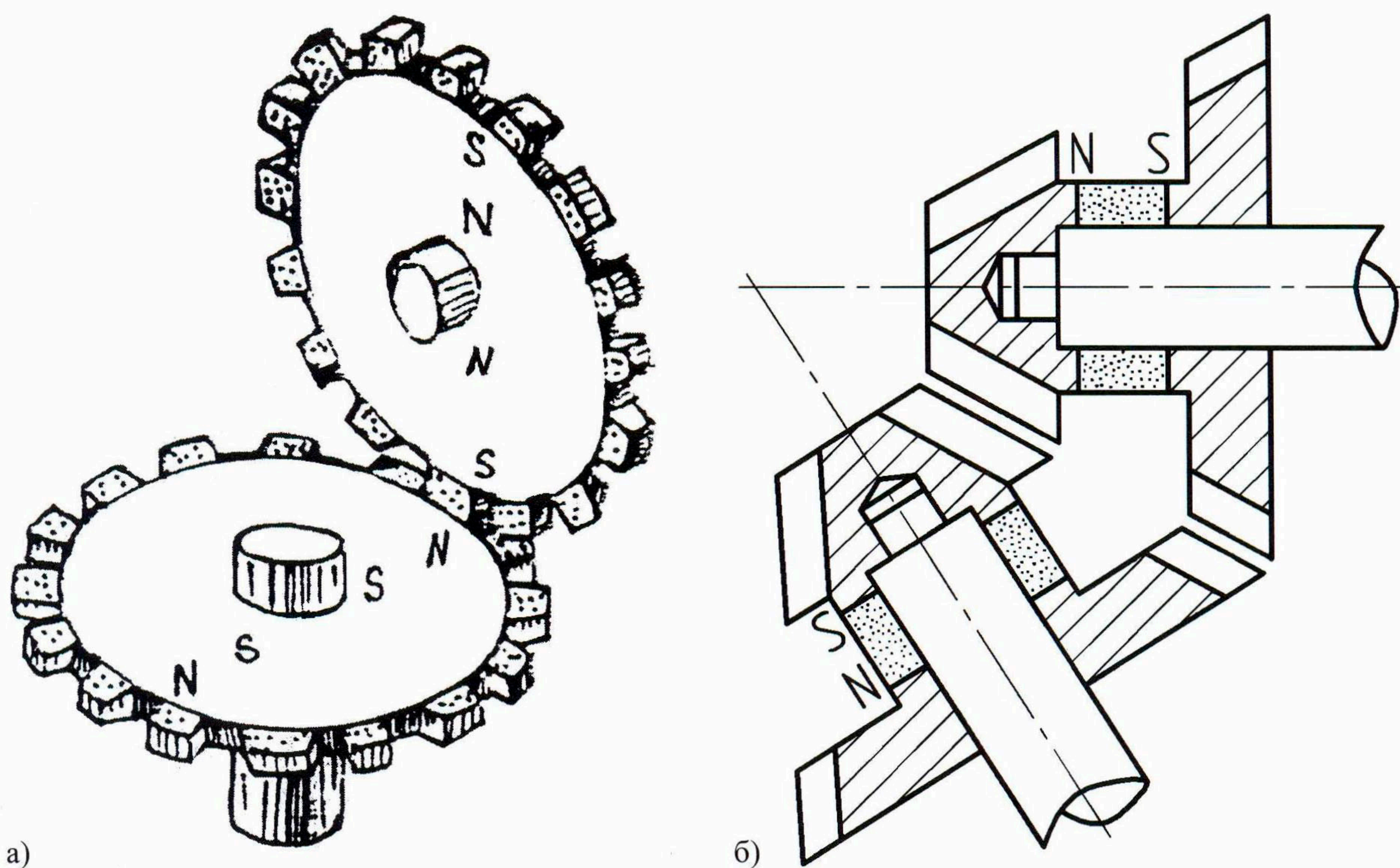


Рис.6. Несоосные механизмы с бесконтактным магнитным взаимодействием (аналог механических конических передач): а) – “плоская” зубчатая магнитная передача; б) – коническая зубчатая магнитная передача

На рис. 5 представлены зависимости среднего размера  $d$  образующихся микрочастиц от удельного давления в контакте  $p_k$  для рассматриваемых пар материалов. Скорость скольжения во фрикционном контакте  $v_c = 157$  мм/с, вакуум  $p = 1 \cdot 10^{-4}$  Па.

Кроме герметичных УБМВ применяют внутрикамерные системы с магнитными механизмами. Принципиально можно создать бесконтактный аналог практически любого механизма с передачами зацеплением, что является актуальным в связи с появлением в промышленности новых магнитных материалов.

На рис. 6 показаны конструкции несоосных механизмов с бесконтактным магнитным взаимодействием зубьев.

Результаты расчётов позволяют сводить к минимуму привносимые загрязнения, повышая при этом надёжность внутрикамерных систем на основе УБМВ с минимальным количеством узлов внешнего трения и оптимизировать параметры вновь проектируемого сверхвысоковакуумного аналитического и технологического оборудования электронной техники.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Протопопов О.Д. Оборудование для контроля и анализа поверхности твердого тела методами электронной и ионной спектроскопии / Машиностроение. Энциклопедия // Ред.совет: К.В. Фролов (пред.) – и др. – М.: Машиностроение. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т.Ш-8 / Под общ. ред. Ю.В. Панфилова. 2000. – § 3.4.1. С.399-411.

2. **Кратенко В.И.** Перспективы развития физико-аналитического оборудования / Электронная промышленность. 1989, вып. 7. С.40-46.

3. **Гревцев Н.В.** Рентгенолитография / Машиностроение. Энциклопедия // Ред.совет: К.В. Фролов (пред.) – и др. – М.: Машиностроение. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т.Ш-8 / Под общ. ред. Ю.В. Панфилова. 2000. – § 2.5.1. С.137-152.

4. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники. В 10 кн. Кн. 7. Электронная обработка / О.С. Моряков. – М.: Высшая школа. 1990. – 128с.

5. **Ивашов Е.Н., Некрасов М.И., Степанчиков С.В.** Исследование фрикционных характеристик твердосмазочных покрытий в вакууме / Органические полупроводниковые материалы. Пермь: 1986. Вып.3. С.175-181.

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

## **INCREASE OF RELIABILITY OF INTRACHAMBER SYSTEMS HIGH VACUUM ANALYTICAL AND THE PROCESS EQUIPMENT**

*Questions of increase of reliability of intrachamber systems of the ultrahigh vacuum equipment are considered at use of devices with contactless magnetic interaction. The technique and results of calculations of devices on introduced pollution by the deterioration microparticles are presented, allowing to reduce to a minimum introduced pollution, to raise reliability of intrachamber systems and to optimise parametres projected ultrahigh vacuum analytical and the process equipment of electronic technics.*

**Keywords:** *The ultrahigh vacuum equipment, Intrachamber systems, Contactless magnetic interaction, Introduced pollution, Deterioration microparticles.*