

ПРИНЦИПЫ СИСТЕМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ



Санкт-Петербург
2006

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики

Кафедра системотехники оптических приборов и комплексов

Рагузин Р. М.

**Принципы системного проектирования
оптических приборов**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Часть II

для студентов, обучающихся по направлению «Оптотехника»



Санкт-Петербург
2006

УДК 658

Рагузин Р. М. Принципы системного проектирования оптических приборов. / Учебное пособие. Часть II. СПб: ИТМО, 2006.- 282 с.

Изложены основные сведения по конструированию и расчету оптических приборов и их механизмов, применяемых в микроскопах, фото-киноаппаратах, адаптивной оптике и т.д.

Систематизирован комплекс вопросов, касающихся выбора компоновки приборов, кинематических схем, процессов фокусирования, стабильности несущих конструкций и исследования механизмов. Приведено большое количество схем и конструкций механизмов, используемых в отечественных и зарубежных оптических приборах.

Пособие предназначено для студентов старших курсов. Оно будет также полезным для работников оптической промышленности.

Ил. - 146, табл. - 16, список лит. - 26 наим.

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и оптотехники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов 654000 “Оптотехника” и специальности 190700 <<Оптико-электронные приборы и системы>>.

Рецензенты: Грамматин А. П., д.т.н., профессор СПб ГУИТМО
Крынин Л. И., к.т.н., доцент СПб ГУИТМО

© Санкт-Петербургский Государственный университет
информационных технологий механики и оптики, 2006

© Авторы: Рагузин Р. М.,
2006

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.	5
Глава 1. Компонетика (композиция) ОП.	7
1.1 Общие сведения и факторы, влияющие на компоненту.	7
1.2 Эскизная проработка компоненту.	11
1.3 Примеры эскизной разработки компоненту.	18
Глава 2. Несущие конструкции оптических приборов.	21
2.1 Общие сведения.	21
2.2 НК основных типов ОП.	24
2.3 Стабильность НК.	31
2.4 Жёсткость НК.	35
2.5 Исследование жёсткости.	38
2.6 Аналитическое определение жесткости.	42
2.7 Влияние жёсткости на функционирование ОП.	50
2.8 Повышение стабильности и жёсткости конструкции.	53
2.9 Колебания НК.	61
2.10 Система “оператор – НК”.	66
2.11 Унификация НК.	70
2.12 Заключение.	70
Глава 3. Анализ схем механизмов ОП.	72
3.1 Неподвижные соединения.	78
3.2 Механизмы для передачи движения.	84
Глава 4. Направляющие для точных перемещений.	90
4.1 Направляющие с трением скольжения.	90
4.2 Направляющие качения.	98
4.3 Направляющие с молекулярным трением и другие типы направляющих.	107
Глава 5. Фокусирующие механизмы оптических приборов.	111
5.1 Общие сведения.	111
5.2 Процесс фокусирования.	113
5.3 Визуальное фокусирование.	115
5.4 Типовые схемы и конструкции фокусирующих механизмов с визуальным наведением.	120
5.4.1 Фокусирующие механизмы юстировочных устройств, объективов и окуляров.	120
5.4.2 Фокусирующие механизмы световых микроскопов.	123
5.4.2.1 Кинематические схемы фокусирующих механизмов.	126
5.4.2.2 Конструкция фокусирующих механизмов микроскопов.	139
5.4.2.3 Информационное моделирование и краткосрочное прогнозирование ФМ микроскопов.	148

5.4.3 Фокусировочные механизмы фотоаппаратов и других фотосистем	149
5.4.4 Фокусировочные механизмы интерферометров	153
5.5 Автоматическое фокусирование	156
5.5.1 Системы автоматического фокусирования фотоаппаратов.....	158
5.5.2 Системы автоматического фокусирования микроскопов	163
5.5.3 Системы автоматического фокусирования других оптических приборов	169
5.5.4 Системы автоматической фокусировки адаптивной оптики	171
5.5.5 Системы автоматической фокусировки систем машинного зрения	177
5.6 Стабильность фокусировочных механизмов	180
5.7 Влияние системы "человек – оптический прибор" на конструкцию фокусировочного механизма	187
5.8 Испытания и аттестация фокусировочных механизмов.....	189
5.9 Пример расчёта схем фокусировочных механизмов микроскопов	191
Глава 6. Крепление оптических деталей	200
Глава 7. Перемещение оптических деталей	211
Глава 8. Юстировочные механизмы оптических приборов	218
Глава 9. Диафрагмы и щели.....	235
Глава 10. Узлы источников излучения	243
Глава 11. Зажимные устройства и механизмы для регулирования плотности хода.....	251
Глава 12. Винтовые механизмы	259
Глава 13. Бинокулярные и тринокулярные насадки микроскопов	268
Заключение.	279
Список литературы.....	280

ВВЕДЕНИЕ

Вторая часть пособия содержит общие технические вопросы проектирования оптических приборов (ОП) и их основных узлов.

Современные оптические приборы состоят обычно из трех основных подсистем: оптической, механической и электронной. Первые две подсистемы входят в любой ОП и поэтому в пособии рассмотрены проблемы, которые связаны именно с этими подсистемами, особенно с оптико – механическими. Оптико – электронная подсистема и автоматика ОП детально рассматриваются в соответствующей литературе.

При системном проектировании оптического прибора и его составных частей (СЧ) или параметрического ряда ОП необходимо учитывать следующие требования, вытекающие из положений, изложенных в ч.1 пособия:

1. Формулировка цели разработки проектирования. Чем точнее она будет сформулирована, тем результативнее окажется конечный итог. Для обоснования цели следует использовать методику, изложенную в ч.1 гл. 3, и другие возможности, которыми располагает разработчик.

2. Определение СЧ и их связей. Разработка и проектирование функционально – структурных схем разного иерархического уровня. Как правило, достаточно сложные современные приборы создаются коллективными усилиями нескольких специалистов – разработчиков, тем не менее ведущий конструктор – проектировщик должен иметь хотя бы элементарные знания о смежных отраслях техники, которые используются при проектировании. Уровень этих знаний должен позволять понимать содержание входов и выходов СЧ, которые создаются другими специалистами, при этом содержание самих СЧ может оставаться для него „черным” ящиком.

3. Соединение в единую конструкцию функциональных, управляющих и несущих СЧ. Этот важный этап включает поиск компонетики (композиции) ОП, определяющей его целостность, единство функций и структуры (единство содержания и формы, см.ч.1, гл.2).

4. Из свойств систем в отношении иерархичности и развития следует, что проектирование целесообразно начинать с эскизных проработок высокого иерархического уровня и методом повторных и постепенных приближений (итерации) подойти к уровню технического проектирования. Обязательным при разработке является выполнение научно-технического прогноза и информационного моделирования (см. ч.1, гл. 5). Для оценки технологичности конструкции желательно определить возможную стратегическую потребность в изделии и объем его выпуска (см. ч.1, гл.4).

5. Все проработки (проекты, расчеты, эксперименты и т.п.) необходимо выполнять в нескольких вариантах. При этом очень полезно составить хотя бы приближенное идеальное решение, которое следует

использовать как меру оценки других вариантов.

Отметим, что при проектировании должны быть выполнены и другие общепринятые работы (экономическое обоснование, математическое и физическое моделирование, испытания, метрологическое и технологическое обеспечение и т.д.), которые сопутствуют разработкам.

Опыт показывает, что в настоящее время использование детерминированного проектирования встречается только для простых изделий. В большинстве случаев имеются случайные составляющие проектных работ и проработка разных вариантов позволяет значительно повысить надёжность проектирования.

Глава 1. Компонетика (композиция) ОП

1.1. Общие сведения и факторы, влияющие на компонентiku

Теория разработки компонентики изделий техники, в том числе и ОП, еще мало разработана и не имеет установившейся методики. Она базируется в основном на использовании аналогий с уже существующими решениями или опыте конструкторов. Такое же положение и с терминологией, касающейся компонентики.

Можно считать, что понятию “компонетика” соответствуют такие определения, как композиция, сюжет, сценарий и т.п., которые выражают организацию отдельных частей в единую, целостную систему.

При проектировании под компонентикой понимается объединение СЧ прибора в необходимую структуру, обеспечивающую выполнение заданных функций.

Каждая СЧ, образующая подсистему прибора, например, оптическая, электрическая и конструктивная схемы, могут иметь свою компонентiku. Но они должны учитывать и общую компонентiku прибора. При этом действует иерархическая подчиненность схем. У отдельных изделий, например, объективов, оптическая схема определяет часто и его компонентiku, а у микроскопов, фотоаппаратов и других более сложных приборов компонентика в основном определяется конструктивной схемой.

Компонетика зависит от большого числа факторов, связанных с назначением ОП и особенностей внешней среды, в которой он работает. Однако, кроме большого числа различий существует и определенная общность ОП. Для выявления общих требований к компонентике рассмотрим структурные схемы высокого иерархического уровня, что позволит выявить общность многих ОП.

Структурная схема высокого иерархического уровня показана на рис. 1.1а. Она состоит из объекта, ОП, выходного устройства (ВУ) и внешней среды.

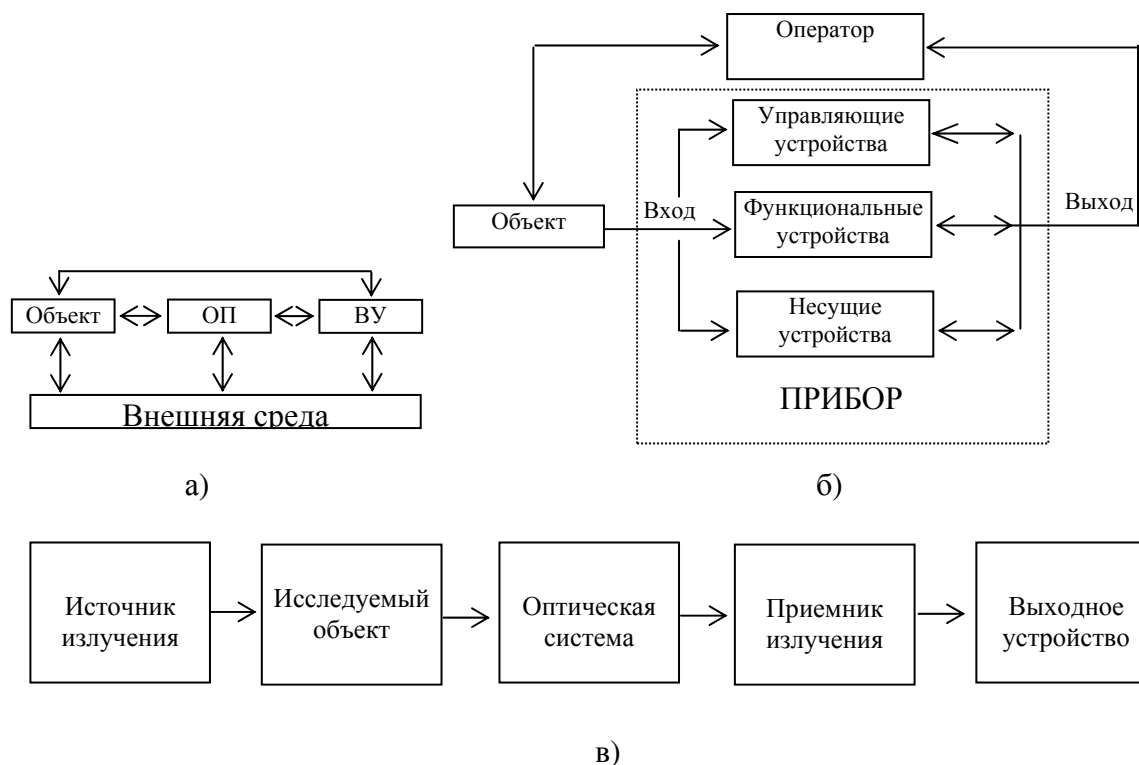


Рис. 1.1. Структурные схемы оптических приборов

Основные свойства каждой СЧ, влияющие на компонентную структуру многих оптико – информационных приборов, приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

СЧ	Свойства
Объект	Оптические, габаритно – весовые, механическое состояние (статическое, кинематическое, динамическое), фазовое состояние (твердое, жидкое, газообразное, кристаллическое, аморфное) и т.д.
ОП	Дальнее или ближнее действие, изучение структуры, процессов во времени, использование применяемой части спектра, интегральное или дифференциальное построение изображения, наблюдение, измерения и т.д, весо – габаритные характеристики и т.д.
ВУ	Человек, электронно – фотометрические приемники излучения, преобразователи изображения и т.д.
Внешняя среда	Вакуум, воздушная, жидкая, твердая, радиоактивная, с особыми температурными условиями, другие условия эксплуатации (лабораторные, бортовые и др.) и т.д.

Из схем и таблицы следует, что на компоненту оптико-информационных приборов влияет достаточно большое количество факторов высокого иерархического уровня.

В начале разработки при формулировке цели определяется назначение прибора, принцип его действия, среда и ВУ, то есть конкретизируется часть из указанных в таблице факторов. Для дальнейшего уточнения требований рассмотрим схему более низкого уровня, показанную на рис 1.1б. Свойства СЧ схемы, влияющие на компоненту и касающиеся управляющих, функциональных и несущих устройств, перечислены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Оптический прибор

СЧ	Свойства
Управляющие	Ручные, полуавтоматические, автоматические, дистанционные и т.д.
Функциональные	Тип оптической системы: телескоп, микроскоп, спектральный прибор, фотометр, для фиксации изображения и т.д.
Несущие	Моноблочные, агрегатно – модульные, консольные, порталные, трубчатые, рамочные и т.д.

Часть этих требований отражается в техническом задании на прибор и это значительно облегчает поиск вариантов компоненту. Затем следует по такой же методике подробнее рассмотреть и СЧ этого уровня. Рассмотрим например, функциональные устройства оптико – информационных приборов, схема и свойства которых показаны на рис. 1.1в и в табл. 1.3.

Технические требования этого уровня определяют функциональные СЧ достаточно подробно. Тип прибора, особенности объекта, приемника излучения и выходного устройства, область спектра, комплекты оптических принадлежностей и т.п. выбираются окончательно.

Такой же уровень содержания на аналогичном этапе определяют и для управляющих и несущих подсистем. Их свойства (параметры, характеристики и т.п.) особенно, если они выполняют функциональные задачи, также определяются окончательно.

Таблица 1.3

Функциональные СЧ	Свойства
Источник излучения	Естественный, искусственный, оптические характеристики (спектр, когерентность и т.п), интегральный или дифференциальный (зонд), форма светового пучка (круглый, щель и т.п.), силовое или возбуждающее воздействие и т.д.
Исследуемый объект	Самосветящийся, несамосветящийся, оптические свойства (изотропный, анизотропный, амплитудный, фазовый, прозрачный, непрозрачный и т.п.) и т.д.
Оптическая система	Телескоп, микроскоп, интерферометр, проекционная, диспергирующая, эндоскопическая и т.д.
Приемник излучения	Глаз, фотослой, фотоэлемент, ФЭУ, ЭОП, телевизионная трубка, ПЗС и т.д.
Выходное устройство	Наблюдатель, регистрирующий прибор, показывающий прибор, ПК и т.д.

Таким образом, рассматривая последовательно схемы и свойства все более низкого иерархического уровня, постепенно выявляют основные требования к компонентике ОП.

1.2. Эскизная проработка компонентики

После выполнения работы по определению основных факторов касающихся назначения (типа) ОП и его основных показателей, разработчик может приступить к эскизной проработке компонентики. При этом необходимо учитывать следующие положения:

1. Важнейшее влияние на компонентику прибора оказывает его назначение и тип оптической системы. Как уже отмечалось, обычно при разработке компонентики классических оптических ОП используют метод аналогий. Однако даже для устоявшейся компонентики возможны новые решения, которые необходимы при изменении структуры приборов (цифровые фотокамеры, очки для защиты зрения и слуха, микроскопы ближнего поля и т.д.), или при появлении нового дизайна.

2. Компонетика ОП и оптико – электронных приборов (ОЭП) может быть моноблочной, агрегатно – модульной или смешанной (см. ч.1, гл. 6,10). Последние два варианта особенно характерны для ОЭП. В этом случае функциональные связи между СЧ обеспечивают за счет кабельной техники и конструктивно – пространственное взаимодействие СЧ не требует жестких связей. Такое взаимодействие должно отвечать требованиям эргономики, дизайна, антропометрии оператора, технологическим и другим технико – экономическим требованиям. Для моноблочной компонентики характерна органическая целостность основных СЧ, хотя некоторые из них могут быть выполнены и в виде модулей.

На рис.1.2 приведены примеры моноблочной компонентики прибора для вертикальных линейных измерений с экраным отсчетом (рис.1.2а) и агрегатно – модульной компонентики полуавтоматического микроскопа (рис.1.2б).

3. Важное влияние на компонентику оказывает форма управления. При ручном управлении (настройке, наводке и т.п.) необходим учет физиологических и антропометрических особенностей оператора.

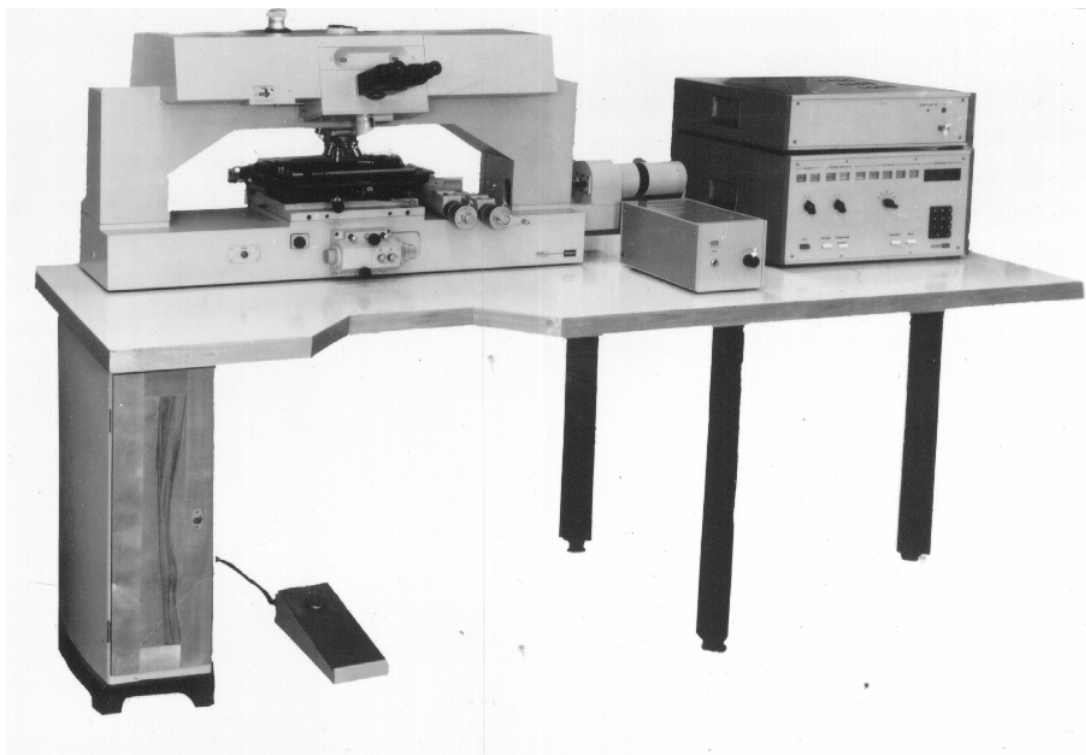
У приборов с высокой степенью автоматизации большинство из этих требований отпадает, что упрощает разработку компонентики прибора, хотя автоматизация обычно существенно усложняет схемы и конструкцию приборов.

На рис.1.3 показан автоматизированный прибор для вертикальных линейных измерений, выполняющий ту же функцию, что и прибор, показанный на рис.1.2а. Налицо отсутствие рукояток управления и разница компонентики.

4. Существенное влияние имеют требования, касающиеся пространственно – координатных отношений с объектом (приборы дальнего и ближнего действия, характер взаимодействия по координатным осям и т.д.). Например, для приборов ближнего действия часто важны габаритно – весовые характеристики объекта, а для приборов дальнего действия они



а)



б)

Рис. 1.2. Моноблочная (а) и агрегатно – модульная (б) компонентики

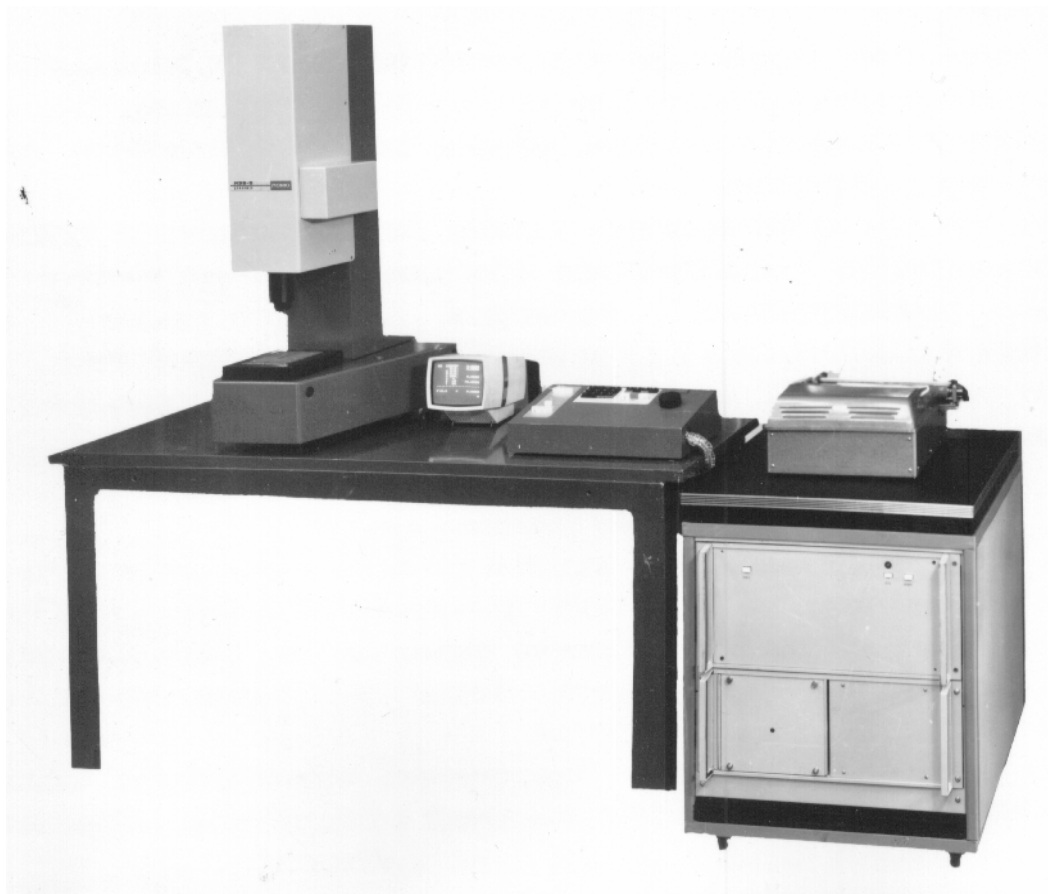


Рис. 1.3. Автоматизированный измерительный прибор

имеют второстепенное значение.

5. Фазовое состояние объекта и особенности внешней среды, а также условия эксплуатации (лабораторные, полевые, внутриполостные и т.п.) определяют компоненту соответствующих приборов. На рис. 1.4 представлен эндоскопический прибор для осмотра желудка. Он снабжен оптическим волоконным каналом, вставляемым через горло внутрь

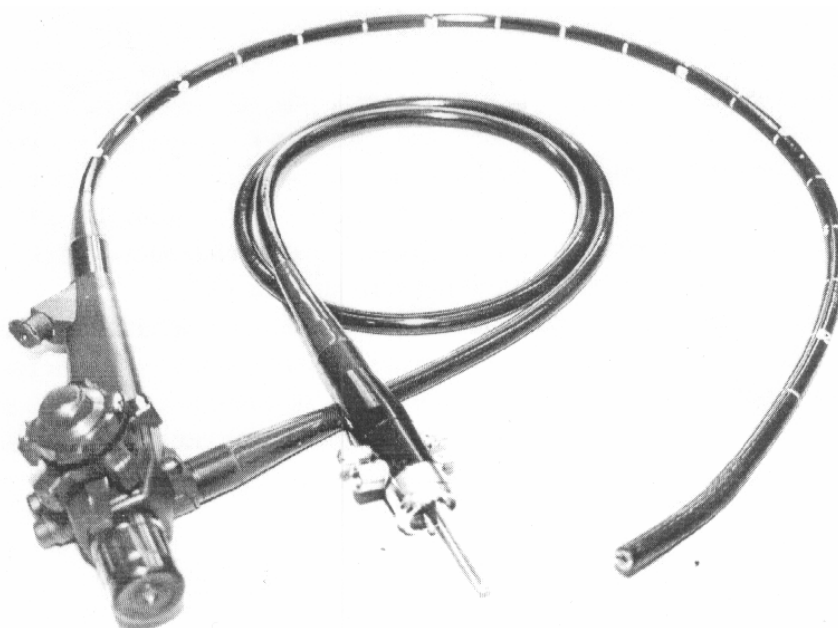


Рис. 1.4. Гастроскоп

пациента.

6. Необходимость обеспечения стабильности и надежности работы ОП, особенно при повышенных требованиях к точности, виброустойчивости и т.п., может оказать решающее влияние на компоновку. Например, стремление к обеспечению стабильности и точности слежения за звездой определило выбор альт – азимутальной монтировки для телескопа с зеркалом диаметром 6 м.

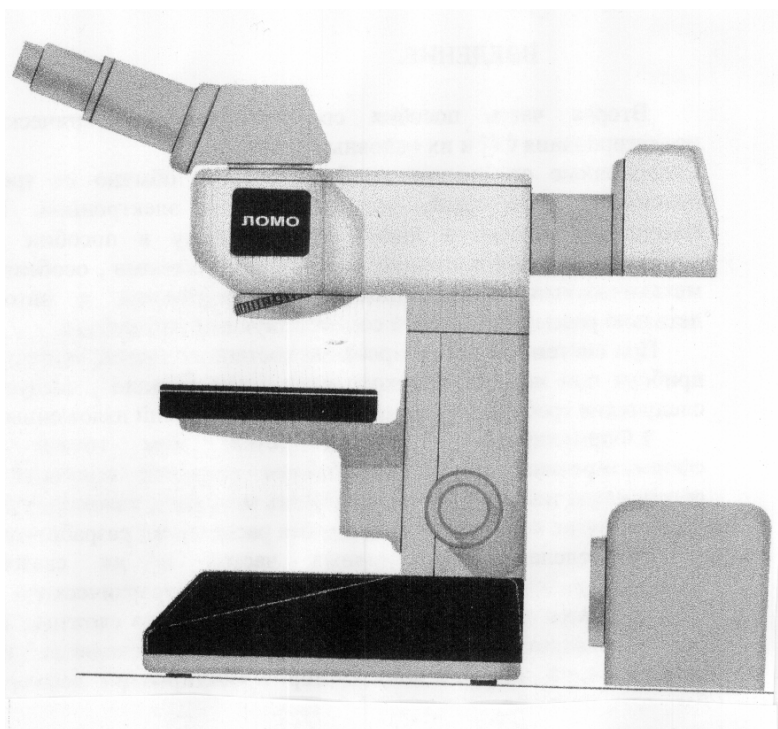
7. В эскизной проработке компоновки должен участвовать и дизайнер. Опыт показывает, что только совместная работа конструктора и дизайнера помогает найти оптимальное решение отношения структуры и функции при создании компоновки прибора. На рис.1.5 приведены эскизные проработки компоновки металлографического микроскопа с верхним расположением объектива. Компоновка выполнена в двух вариантах. Первый вариант (рис. 1.5а) основан на использовании СЧ, взятых из единой системы микроскопов (см.ч.1, гл.10.3). В этом варианте новым является только осветитель отраженного света. Второй вариант (рис. 1.5б) – новое решение компоновки с оригинальным дизайном.

Отметим, что весьма полезным для профессиональной работы конструктора на данном этапе является наличие хотя бы минимальных изобразительных способностей и навыков. Часто первые эскизы компоновки создаются на уровне упрощенных рисунков, показанных на рис. 1.6. На рис. 1.6а приведен эскиз очков ночного видения для велосипедистов, а на рис. 1.6б – эскизы компоновки микроскопов широкого пользования.

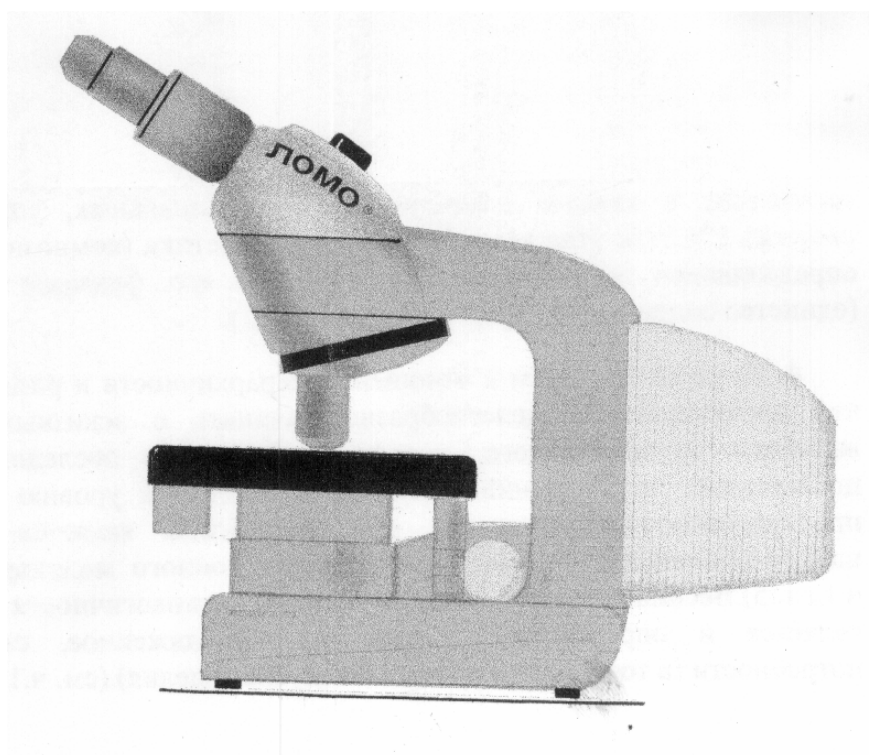
8. Необходимым элементом поиска компоновки является макетирование не только на ПК, но и с использованием материальных макетов, изготовленных из любых материалов. Это связано с тем обстоятельством, что у человека существует разница в восприятии и оценке изображений и натуральных моделей, даже если они выполнены в одинаковом масштабе. Кроме того, появляется возможность проверки удобства работы на приборе. На рис.1.7 показан макет прибора для контроля микросхем.

9. При эскизном проектировании компоновки прибора также должны быть определены (с необходимой степенью приближения) структурно – функциональная, оптическая (габаритная), кинематическая и электрическая схемы. При этом наибольшую трудность представляет согласование всех схем, обеспечение оптимальных условий их реализации, определение пространственного расположения и совместимости схем и СЧ, т.е. разработка конструктивной схемы.

Таким образом, компоновку определяет конструктивная схема, показывающая композицию (взаимодействие, соединение) основных СЧ в пространстве в соответствии с целевой функцией ОП. На стадии эскизной проработки компоновки при необходимости выполняют оценочные

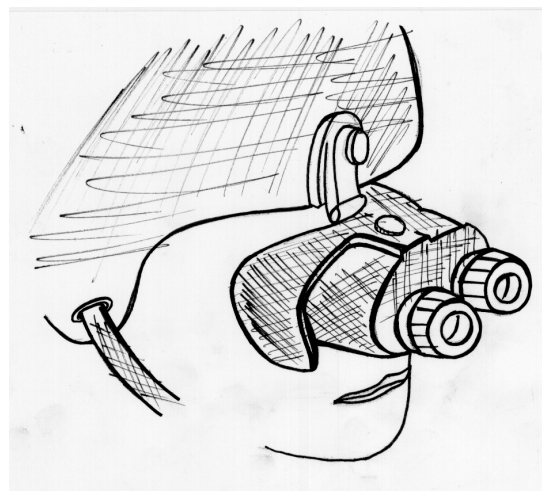


a)



б)

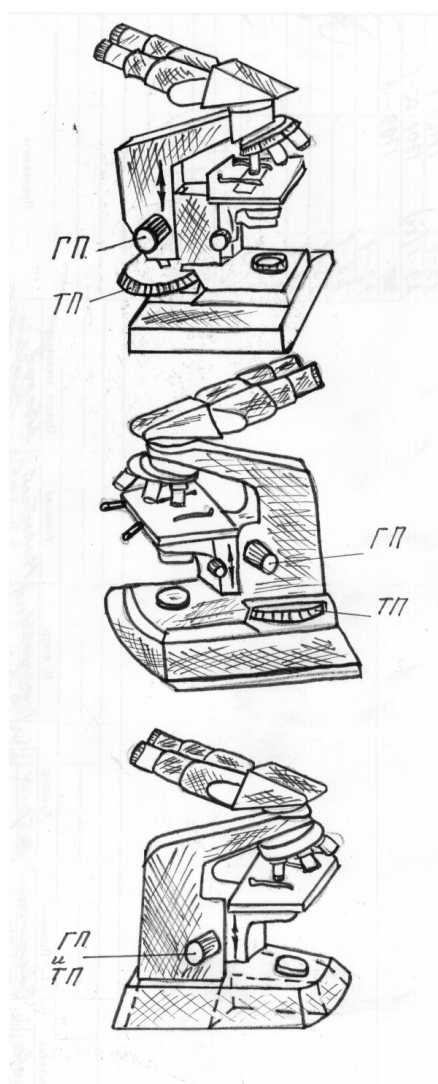
Рис. 1.5. Эскизные дизайн – проекты металлографического микроскопа с верхним расположением объектива



а) Очки ночного видения

б) Варианты микроскопов

ГП – грубая подача, ТП – тонкая подача



Подвижной тубусодержатель
с одной направляющей,
упрощенный осветитель со
встроенным блоком питания

Подвижной столик с двумя
перемещениями на одной
направляющей, упрощенный
осветитель со встроенным
блоком питания

Подвижной столик,
фокусировочный механизм с
одной рукояткой, одной
направляющей и переменным
передаточным отношением,
осветитель со встроенным
блоком питания

Рис. 1.6. Упрощенные эскизы компонентки



Рис. 1.7. Макет компонентки прибора для контроля микросхем

инженерные расчеты и проводят оценку технологичности и экономической эффективности производства.

Желательно при эскизной проработке рассматривать несколько вариантов.

Все проработки в окончательном варианте должны быть согласованы с заказчиком.

1.3. Примеры эскизной разработки компонентики

В повседневной жизни человек неоднократно оказывается в ситуации, когда желательно иметь возможность контроля обстановки за спиной, не оглядываясь назад. Такая возможность может понадобиться как в целях личной безопасности, так и в работе охранников, сторожей, воспитателей детских учреждений во время прогулок, спортсменам на дистанциях и т.д. Попробуем спроектировать прибор, который будет отвечать таким потребностям.

Структурная схема прибора включает объект, ОП и ВУ. Используя данные табл. 1.1, мы можем определить, что нас интересуют оптические свойства объекта, ОП – прибор дальнего действия, ВУ – человек или электронно – оптический приемник (ЭОП).

Используя данные табл. 1.2, можно сделать выводы: управление прибором ручное или автоматизированное, в качестве функциональной СЧ можно использовать зеркало или телесистему, несущие устройства могут быть выполнены в любом варианте.

Из данных табл. 1.3 следует, что в нашем случае несамоосвещающийся, непрозрачный объект освещается естественным или искусственным источником света. Приемником излучения может являться глаз, ЭОП, телевизионная трубка, ПЗС. Но выходное устройство – человек.

Из дополнительных положений, которые изложены в разделе 1.2, следует обратить внимание на условия эксплуатации (см. п. 5), вытекающие из задачи. Прибор должен быть легким (весом не более 0,5 – 1 кг), пригодным в любых климатических условиях, простым и надежным в эксплуатации.

Таким образом мы можем составить структурную схему, достаточно подробно описывающую наш прибор. Такая схема приведена в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Разрабатываемый прибор.

Наименование СЧ	Свойства СЧ	Кол-во вариантов
Источник излучения	Имеется, отсутствует	2
Объект	Самосветящийся, несамосветящийся	2
Оптическая система	Зеркало, проекционная	2
Приемник излучения	Глаз, ЭОП, телевизионная трубка, ПЗС	4
Управление	Ручное, автоматизированное	2
Условия эксплуатации	Визуальное наблюдение, вес 0,5 – 1 кг, обычные климатические условия	1
Выходное устройство	Человек	1

Итого имеем 64 варианта решений.

Из данных таблицы следует, что возможны два разных технических решения:

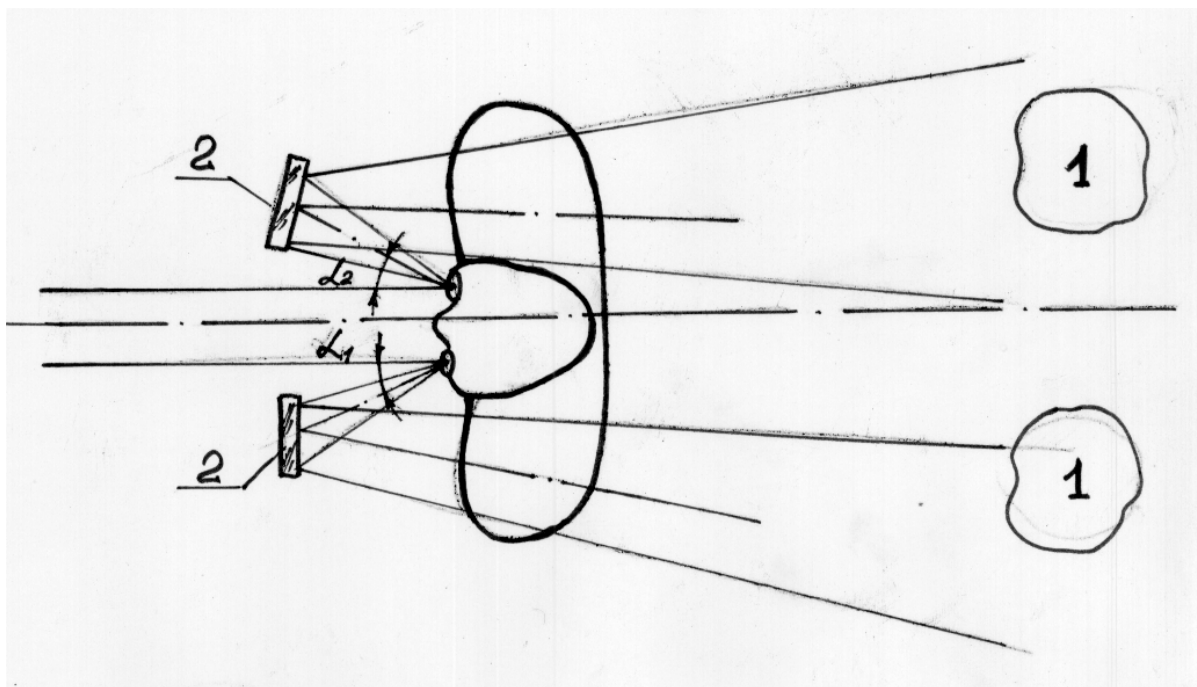
- зеркальный прибор с ручным управлением,
- автоматизированный прибор с разными приемниками излучения.

Может быть предусмотрен и дополнительный источник освещения.

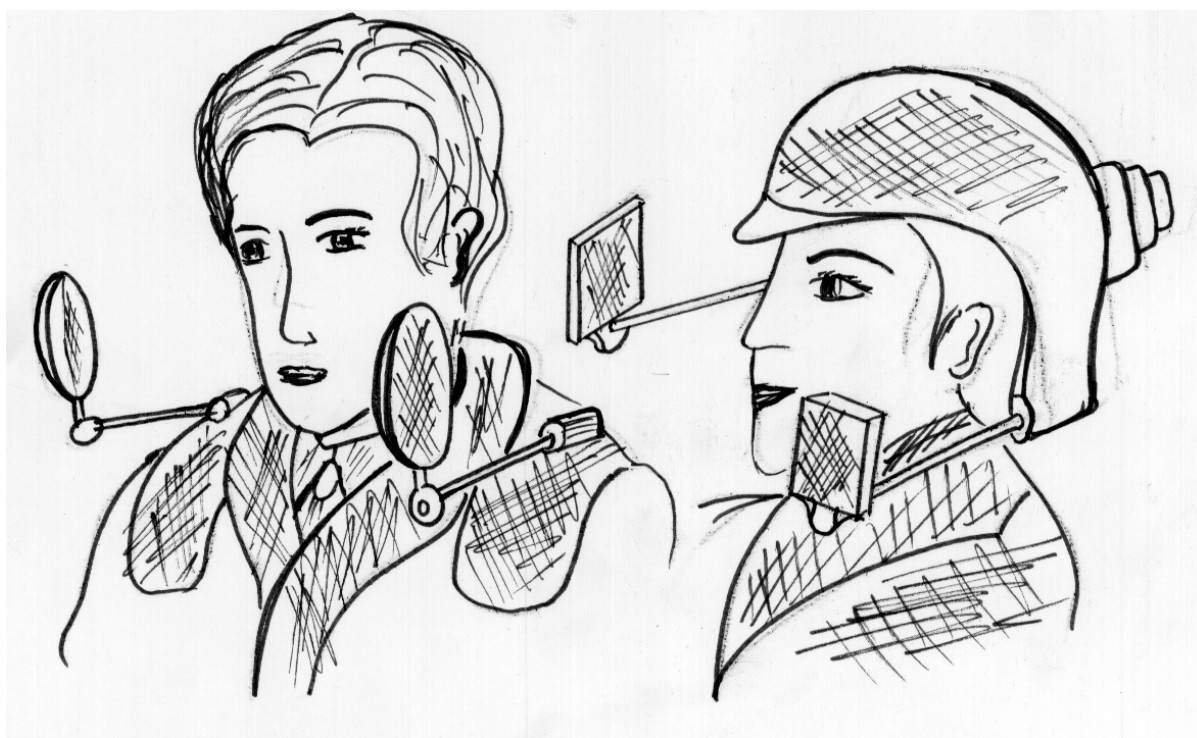
Рассмотрим подробнее возможную компонентку первого варианта. На рис.1.8 представлена схема расположения основных СЧ в пространстве. Изображение объектов 1 зеркалами 2 направляется в глаза человека. Для наблюдения за объектом необходимо повернуть глаз на угол α_1 или α_2 . Это позволит человеку контролировать зону, расположенную за спиной.

Крепление зеркал можно производить, например, на каркасе, надеваемом на плечи (см. рис. 1.8б) или расположенном на головной каске. Первый вариант предпочтительнее, так как он обеспечивает более стабильное положение зеркал.

При использовании других приемников излучения, например, телевизионной цифровой камеры, возможна ее установка на каске или плечевом каркасе и установка экранов с изображениями на плечевом шарнире на местах, которые в первом варианте занимали зеркала, или на козырьке каски. Блоки управления и питания могут монтироваться в любом месте.



а)



б)

в)

Рис. 1.8. Прибор для наблюдения

Глава 2. Несущие конструкции оптических приборов

2.1. Общие сведения

Механическая подсистема ОП характеризуется, как и любая система, определенными свойствами: целью, функционированием, структурностью, иерархичностью, развитием и т.д.

Она включает, как правило, механизмы разного назначения и несущие конструкции (НК). Хотя НК также относятся к механизмам, ввиду их важной роли они выделены в пособии в отдельный раздел.

Как уже отмечалось, большинство оптико – информационных приборов состоит из трех подсистем: функционирования, управления и НК (см. рис. 1.1б).

НК образуется совокупностью СЧ, связывающих подсистемы функционирования и управления в единую конструкцию. Они осуществляют механическое взаимодействие деталей, узлов и других СЧ в пространстве. Иерархия НК включает три уровня : НК прибора в целом, его узлов и деталей.

НК прибора включает в себя корпусную подсистему, состоящую из корпусов, стоек, оснований и других подобных деталей, детали и узлы для установки и перемещения ОС (объективов, зеркал, призм и т.п.), а также детали и узлы для установки и перемещений других функциональных и управляющих СЧ, устанавливаемых на корпусных деталях (например, узлы для перемещения объекта).

При эксплуатации приёмное устройство через ОС воспринимает информацию об объекте (сенсорный вход) и (или) воздействует каким-либо образом на объект или ОП (моторный выход).

Эти взаимодействия и определяют важнейшую задачу разработки – компонентную структуру прибора в целом , которая определяется в основном компонентикой НК.

Важное значение НК занимают и в экономике производства. В микроскопах , телескопах , спектральных и многих других приборах они составляют от 30 до 80 % стоимости , металлоёмкости и т. д. Даже в таких узлах, как объективы и окуляры, затраты на НК составляют не менее 10 – 20%.

Общие требования к НК, вытекающие из структурной схемы (см. рис. 1.1б), связаны с функционированием и управлением ОП, зависят от условий эксплуатации и определяются технологией изготовления и экономикой:

1. Надёжность функционирования и управления требует стабильности функционирования прибора в пространстве и времени. Это условие включает комплекс требований, касающихся точности ОС, механических систем (МС) и электронных систем, жёсткости и

виброустойчивости конструкции, тепло – и износоустойчивости и т. д.

2. Требования, зависящие от условий эксплуатации, связанные с объектом, оператором и той средой, в которой находится ОП. Среда в отдельных случаях оказывает существенное влияние на НК. Например, ОП для исследований в «горячих» лабораториях радиоактивных материалов или ОП, используемые в космосе, обычно обеспечиваются дистанционным управлением, изготавливаются из специальных материалов и снабжаются необходимой защитой от излучения, микрометеоритов и т.п.

3. Технологичность НК, т.е. обеспечение их заданных свойств при наименьших затратах, которые определяются серийностью производства, простотой и соответствием форм деталей технологическим процессам, используемым при их изготовлении, удобством и минимальной трудоёмкостью сборки и юстировки, широкой унификацией конструкции, простотой контроля и другими требованиями, непосредственно вытекающими из технологии изготовления.

4. Требования по обеспечению экономической эффективности можно разделить на внешние, касающиеся эффективности функционирования ОП (получение максимальной информации об изучаемых объектах, повышение производительности труда, простота обслуживания и ремонта и т.д.), и внутренние, определяющие себестоимость изготовления (сложность устройства и компонентика ОП, серийность изготовления и т. п.).

Назначение ОП весьма влияет на компонентика НК. НК фотоаппаратов, телескопов, спектральных приборов и лазеров, например, имеют присущие только им особенности. Прежде всего отметим влияние взаимодействия ОП с объектом при определении его пространственных характеристик (формы, координат и т.д.) или его внешних и внутренних свойств (например, структуры, молекулярного состава, цвета). По этим признакам можно разделить ОП на четыре основные группы: ОП дальнего действия и ближнего действия, ОП для исследования свойств вещества объектов и для определения временных параметров. Возможно и соединение целей приборов.

НК ОП дальнего действия снабжаются устройствами, обеспечивающими наводку, слежение или сканирование объекта. Приборы этой группы работают в отражённом свете или с самосветящимися объектами. НК ОП ближнего действия имеют непосредственный контакт с объектом и должны учитывать габаритно-весовые характеристики объекта, особенности исследования при изучении внутренней или наружной структуры (необходимость наличия проходящего или отражённого света) и другие физические и химические свойства объекта.

Особенности эксплуатации (лабораторные, дорожно – полевые, бортовые и т. д.), а также климатические условия или требования в отношении стерилизации, дистанционного, ручного или

автоматизированного управления и обслуживания также оказывают существенное влияние на НК. Точность и жёсткость, расположение оптической оси в пространстве, взаимосвязи СЧ, степень доступа к СЧ, технологичность эксплуатации, принципов действия и схем, сборки и изготовления, эргономические, инженерно – психологические и другие структурно – функциональные, технологические и экономические факторы также влияют на классификацию и выбор НК.

К числу внешних факторов, влияющих на НК, относится, во - - первых, постоянный рост потребительских свойств изделий, таких как точность и воспроизводимость, объёмы перерабатываемой информации, разрешающая способность, расширение диапазона используемого спектра и т.д. На рис. 2.1 показано повышение потребительских свойств.

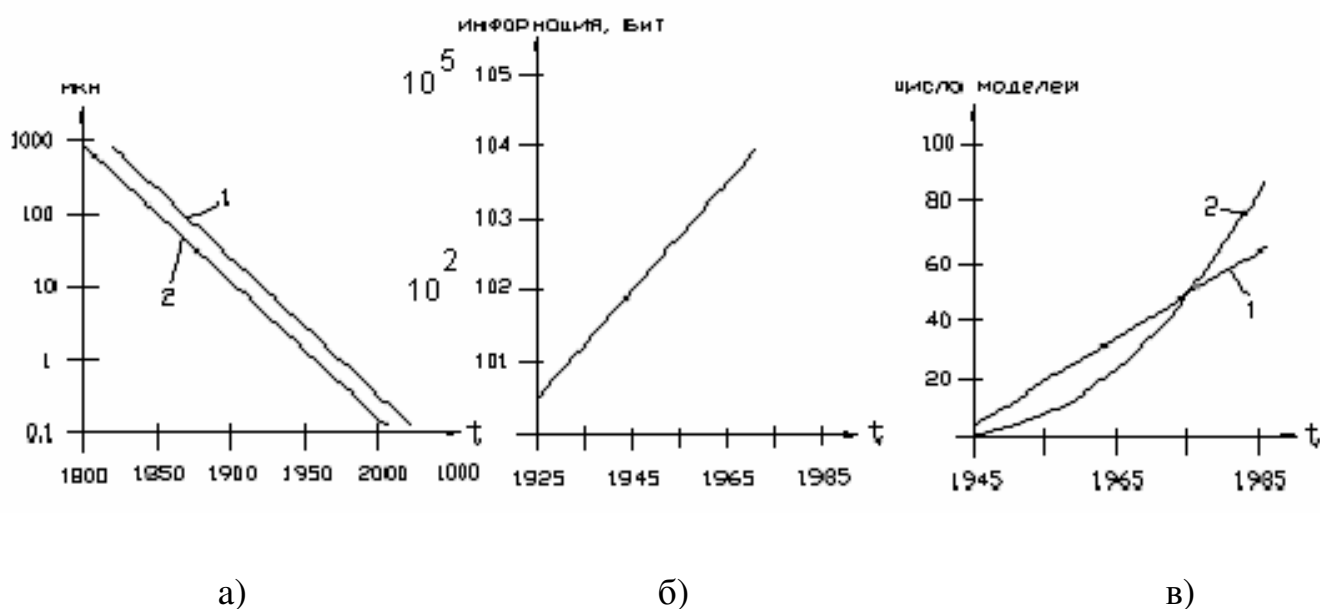


Рис. 2.1. Тенденция развития оптических приборов

Кривая 1 (рис. 2.1а) характеризует точность измерений в производственных условиях, а кривая 2 – в лабораторных. Из графика видно, что примерно за 50 лет точность измерений повышается на порядок. На рис. 2.1б показан рост потоков информации в приборах, а на рис. 2.1в – использование новых приёмников информации в микроскопах (кривая 2). Такие тенденции требуют повышения стабильности в пространстве и во времени.

Другой внешний фактор учитывает совершенствование системы “человек – ОП” с целью повышения комфорта работы, и в конечном итоге, увеличение эффективности эксплуатации приборов.

Важной причиной также является развитие технической эстетики внешних форм, а в отдельных приборах, особенно народного потребления (фотоаппаратах, бытовых биноклях и т.д.), изменение моды силуэтов, архитектоники и т.п.

У некоторых ОП большое влияние на НК оказывают и специальные требования (например, вес и габариты, степень автоматизации, использование приборов в радиоактивной среде).

К внутренним факторам относятся изменение схем и компонентики приборов, использование новых материалов, изменение габаритов или других параметров объектов, разработка новых форм НК и т.п. Существенное влияние на НК оказывают также технологичность изготовления, сборки и юстировки ОП.

Все перечисленные факторы следует рассматривать в их развитии.

Общее число факторов, влияющих на НК, превышает несколько сот единиц, количество которых постоянно пополняется по мере появления новых ОП и принципов их действия, а также при изменении условий эксплуатации.

2.2. НК основных типов ОП

Приведённые примеры иллюстрируют компонентiku НК или их конструктивные схемы. Они охватывают лишь небольшую часть существующих модификаций, имеющих тысячи вариантов.

Напомним, что *конструктивной схемой* называется схема, определяющая композицию (взаимодействие, соединение) основных СЧ изделия (различных схем, узлов, блоков, поверхностей и т.д.) в пространстве в соответствии с целевой функцией ОП.

В общем случае пространственное взаимодействие системы “объект – ОП” характеризуется изменением трёх систем координат: прибора, объекта (по шесть степеней свободы) и их перемещением относительно абсолютных координат. Таким образом, минимальное число степеней свободы (перемещений) составит 216. Если учесть, что у многих ОП и объектов происходит несколько перемещений по координатам, то число возможных пространственных взаимодействий системы “объект – ОП” значительно возрастает.

НК ОП дальнего действия состоят из двух основных СЧ: трубы или ее аналога, с вмонтированной в неё оптической телескопической системой и устройства, обеспечивающего необходимые повороты трубы. На рис. 2.2 приведены конструктивные схемы некоторых НК телескопов, геодезических и других приборов.

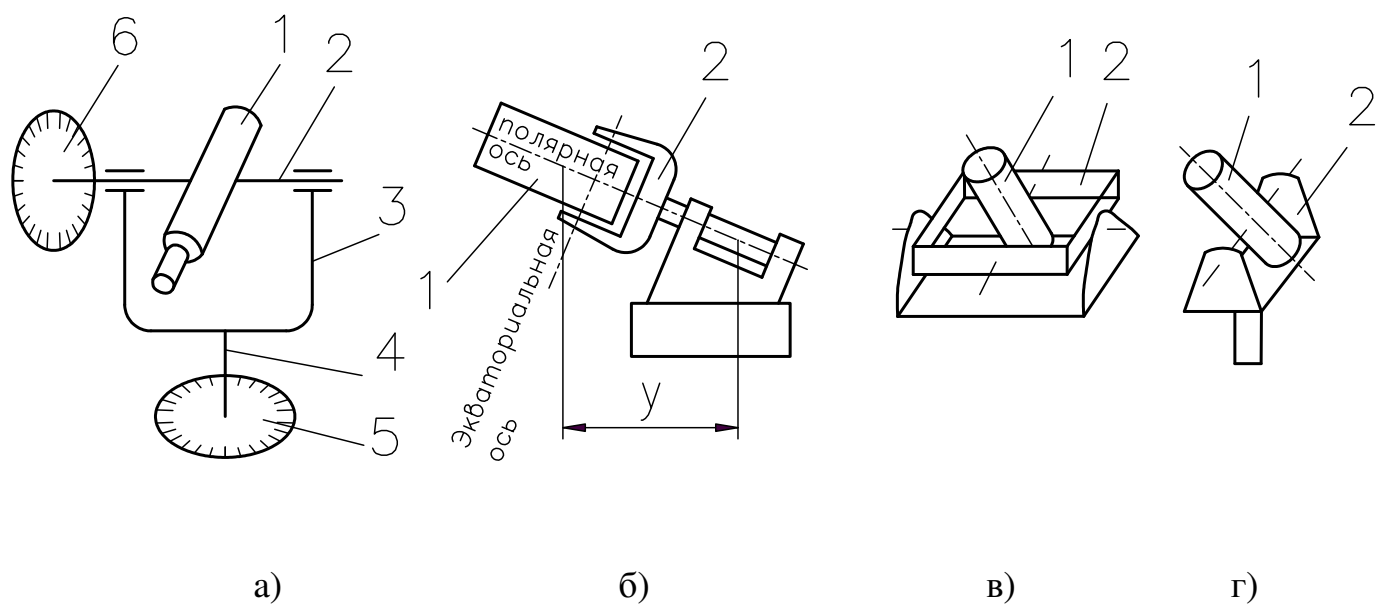


Рис. 2.2. НК телескопических приборов

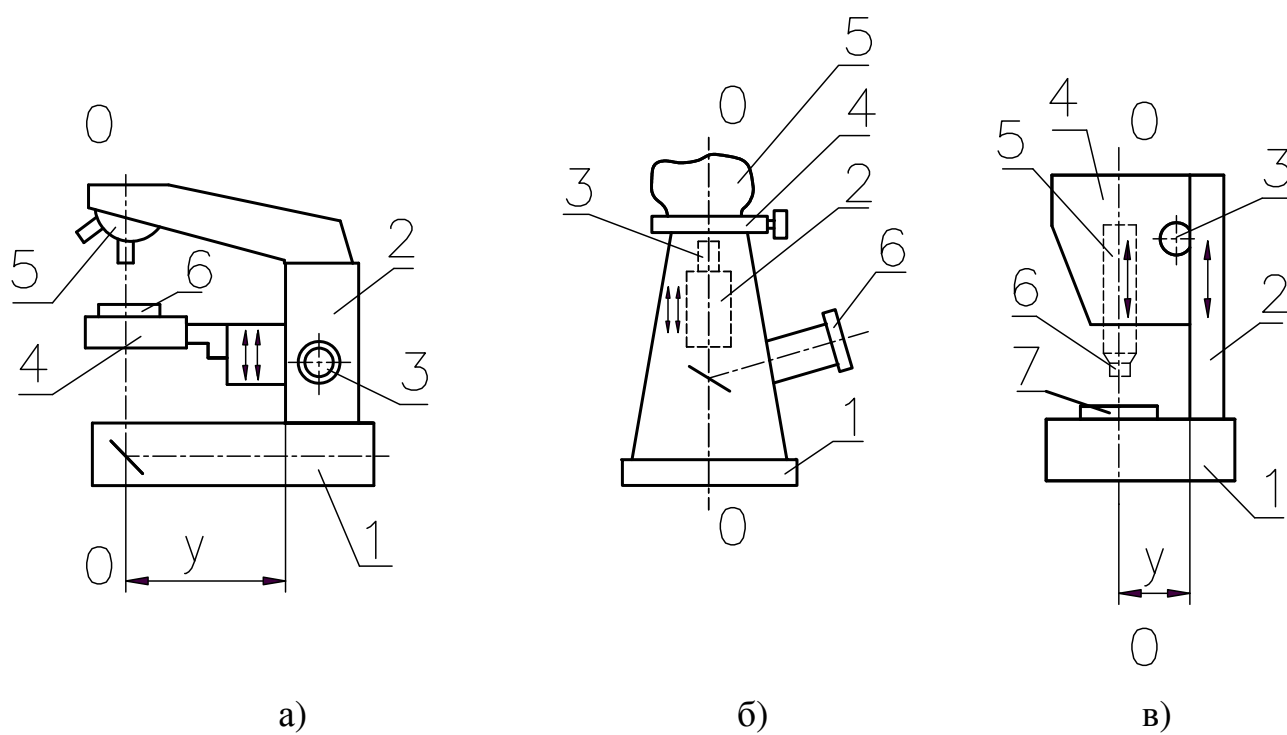


Рис. 2.3. НК микроскопов и КИП

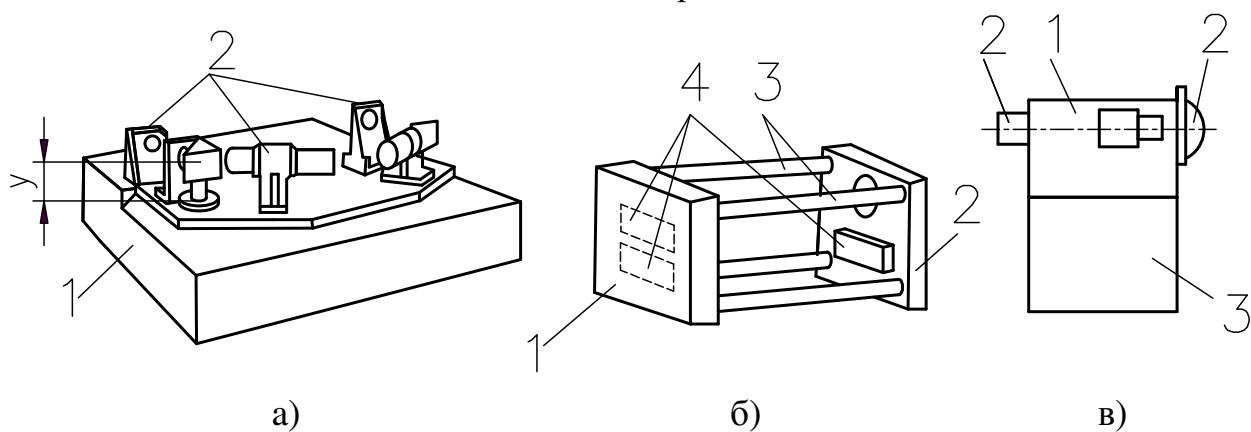


Рис. 2.4. НК спектральных приборов

Схема НК, показанная на рис. 2.2а применяется в геодезических, астронавигационных и других приборах (теодолитах, стереотрубах, секстантах и т.п.). Она включает трубу 1, в которой установлена ОС, ось 2, вилку 3, ось 4 и отсчётные системы 5 и 6. Применяют и разновидность схемы, в которой на оси 2 устанавливается головная призма, а линзовая система зрительной трубы располагается по оси 4. В других приборах, например, меридианном круге, пассажном инструменте используют только горизонтальную ось. У телескопов (рис. 2.2 б, в, г) труба 1 устанавливается на монтировку 2. При астрономических наблюдениях ось трубы должна быть направлена на объект так, чтобы объект находился в поле зрения. Для телескопов используют экваториальную или параллактическую (рис. 2.2 б) и азимутальную монтировки. Последняя бывает двух типов: горизонтальная (рис. 2.2 в) и альт – азимутальная (рис. 2.2 г), аналогичная показанной на рис. 2.2 а.

В экваториальной монтировке одна ось направлена на полюс мира (полярная ось), а другая лежит в плоскости экватора. Поэтому, для слежения за звездой достаточно навести телескоп на звезду и поворачивать его вокруг полярной оси. На азимутальной монтировке при слежении осуществляют движение вокруг обеих осей, что усложняет системы управления.

Труба 1 у приборов дальнего действия имеет массу от нескольких сот граммов (у геодезических приборов) до 100 тонн (у большого азимутального телескопа (БТА), имеющего главное зеркало диаметром 6 м. Масса НК изменяется от нескольких килограммов до 800 тонн.

Экваториальная монтировка имеет центр тяжести трубы, смещённый относительно опоры оси (на величину Y). Для уменьшения деформации монтировки предлагаются даже конструкции, плавающие в водяной ванне. У азимутальной монтировки центр тяжести трубы совпадает с осью симметрии монтировки.

ОП ближнего действия, к которым относятся микроскопы, лупы, эндоскопические приборы и другие лабораторные приборы, входят в непосредственную связь с объектом и на их конструктивные схемы влияют:

1) пространственные характеристики объектов – габаритные размеры, используемая система координат (прямоугольная, полярная), число измеряемых координат, место расположения объекта и другие;

2) форма объекта;

3) масса объекта (в целях обеспечения устойчивости объекта опорные поверхности располагают перпендикулярно к направлению силы тяжести объекта);

4) способ наблюдения, измерения или исследования свойств объекта.

Эти условия определяют выбор наблюдательной, измерительной и

других систем, а также способ освещения (проходящий или отражённый свет, или смешанное освещение). В отдельных случаях важную роль играет физический принцип действия прибора (интерференция, поляризация и т. д.) или другие свойства объекта (исследование живых объектов, нагревание и охлаждение и т. д.);

5) антропометрические и психофизиологические параметры операторов, работающих на ОП.

Из внутренних факторов отметим взаимное расположение и перемещение объекта и ОС, а также требования в отношении точности и жёсткости НК.

На рис. 2.3 показаны НК ОП ближнего действия.

НК, показанная на рис. 2.3а, широко используется в световых микроскопах, а также в иных ОП. Она включает в себя штатив, состоящий из основания 1 с осветительным устройством (не показанном на рисунке) и тубусодержателя 2 с фокусировочным механизмом, рукоятки управления 3 которого расположены с обеих сторон. На направляющей фокусировочного механизма установлен предметный столик 4, а в револьвер 5 ввинчиваются сменные микрообъективы.

Вертикальная оптическая ось смещена относительно механической опорной поверхности направляющей на величину Y . Объект 6, устанавливаемый на столик 4, располагается под объективом. Фокусирование осуществляется перемещением объекта.

На рис. 2.3б показана НК микроинтерферометра, состоящая из корпуса 1, в котором смонтирован фокусировочный механизм, имеющий направляющую 2 объектива 3 микроинтерферометра. Предметный столик 4 неподвижно закреплён на корпусе и на него сверху устанавливается измеряемый объект 5. Наблюдение интерференционной картины, характеризующей микрорельеф детали, проводится через окуляр 6. НК имеет вертикальную оптическую ось ОО, совпадающую с механической, и объект располагается над объективом. Фокусирование осуществляется перемещением объектива.

На рис. 2.3в показана НК, используемая в контрольно – измерительных приборах. Она включает в себя штатив, состоящий из основания 1 и стойки 2, вдоль которой с помощью рукоятки 3 перемещается измерительная головка 4, внутри которой смонтировано отсчётное устройство 5 со щупом 6, перемещающееся вдоль оси ОО. Измеряемая деталь устанавливается на сменный предметный столик 7. Результаты измерений отсчитывают на экране или с помощью электронной цифровой системы. НК имеет вертикальную измерительную ось, смещённую относительно механической опорной поверхности на величину Y .

Рассмотрим НК приборов для исследования вещества.

На рис. 2.4 приведены НК некоторых спектрофотометрических приборов.

НК, показанная на рис. 2.4а, характерна для многих призмных и

дифракционных спектрографов и спектрофотометров. На верхней плоскости станины 1 устанавливаются оптические детали и узлы, а в нижней части станины располагаются кинематические механизмы и электронные блоки. Сверху узлы закрываются кожухом. Горизонтальная оптическая ось прибора смещена относительно механической опорной плоскости на величину Y .

На рис.2.4б показана НК спектрографа, которая состоит из передней и задней стенок 1 и 2, скреплённых тягами 3, выполненными для температурной компенсации из инвара. На стенках расположены оптические узлы прибора: щель, зеркала, сменные диспергирующие блоки, кассеты и другие узлы, закрытые крышками. В этой конструкции оси прибора расположены горизонтально и примерно совпадают.

Рис. 2.4в иллюстрирует НК вакуумного спектрографа, основная часть которого включает трубу 1, закрытую с торцов крышками 2. Щель, кассета и решетка установлены внутри трубы, которая в свою очередь закреплена на стойке 3. В этом приборе оптическая и механическая оси расположены горизонтально и примерно совпадают.

На рис. 2.5 показана конструктивная схема фотоаппарата, на рис. 2.5б – аэрофотоаппарата, а на рис. 2.5в – киносъёмочного аппарата.

НК всех аппаратов имеют корпус 1, на котором установлены объективы 2, устройства для перемотки и экспонирования плёнки 3, ОС 4 для наблюдения за объектом и другие узлы: счётчики, экспонетрические устройства, приводы и т.д.

Оптические оси ОП совпадают с осями НК. Фокусирование осуществляется перемещением объективов или линз внутри ОС (внутренняя фокусировка).

На рис. 2.6 показаны НК многолучевого интерферометра Фабри – Перо (рис. 2.6а), фазового угломера (рис. 2.6б) и рамная конструкция (рис. 2.6в), иногда используемая в ОП.

Конструкция интерферометров Фабри – Перо хорошо опробована. Зеркальные пластины 1 и 2 (см. рис. 2.6а) устанавливаются в стальной инварной трубе 3 и разделены промежуточным кольцом 4, которое на своих торцах имеет три выступа, расположенных под углом 120° .

При вращении винтов 5 через пружины 6 и упоры 7 усилия передаются на пластины 2 и 1 и выступы промежуточного кольца 3. За счёт упругих деформаций этих деталей проводится установка отражающих поверхностей с точностью до 0,01 интерференционной полосы.

Обычно оптическая ось интерферометра располагается горизонтально и совпадает с механической осью.

В НК фазового угломера (рис. 2.6б) узлы объектива 1, светоделительного блока 2, модулятора 3, конденсоров 4, приёмников излучения 5 и электронного блока смонтированы на пластинах круглой формы и установлены на трех стержнях 7 в корпусе 8. Здесь

оптическая и механическая оси приборов совмещены.

НК из уголкового проката показана на рис. 2.6в. Она используется для ОП, электронных блоков, пульсов, лабораторных столов и других устройств, имеющих большие габариты. НК отличается простотой, доступностью при монтаже узлов и юстировке.

Из обзора следует, что в отношении жёсткости можно выделить два основных типа НК: с оптической осью, смещённой относительно опоры (вылет Y на рис. 2.2б; 2.3а, в, 2.4а), и с оптической осью прибора, совпадающей с осью конструкции или расположенной внутри опоры (см. рис. 2.2а, в, г; 2.3б, 2.4б, в, 2.5, 2.6а, б).

По формообразованию основных корпусных деталей различают следующие НК:

- моноблочные, использующие жёсткий корпус, выполненный из одной или нескольких соединённых деталей (рис. 2.3б, 2.5);
- трубчатые (рис. 2.4в, 2.6а). Такие НК широко применяются при разработке оптических узлов, компоновка которых определяется оптической осью (объективы, окуляры, трубы телескопов, зрительные трубы и т.п.);
- НК, использующие для установки оптических элементов одну или несколько монтажных плит, плат или других плоских поверхностей (рис. 2.4а, 2.6б);
- рамные НК (рис. 2.6в), изготовленные литьём или сваркой;
- НК, употребляющие направляющие различного типа (например, НК оптической скамьи, направляющие вращения телескопов (рис. 2.2));
- НК в различных комбинациях.

На развитие НК большое влияние оказывает эволюционное развитие ОП. На первом этапе прибор полностью обслуживается оператором, а на втором – системы его функционирования и управления частично автоматизируются. На этих этапах НК обычно меняется незначительно, поскольку они должны учитывать функции оператора. На третьем этапе, при переходе к полной автоматизации, НК претерпевают большие изменения. Помимо трансформации компоновки могут вводиться изменения, вызванные повышением требований к НК.

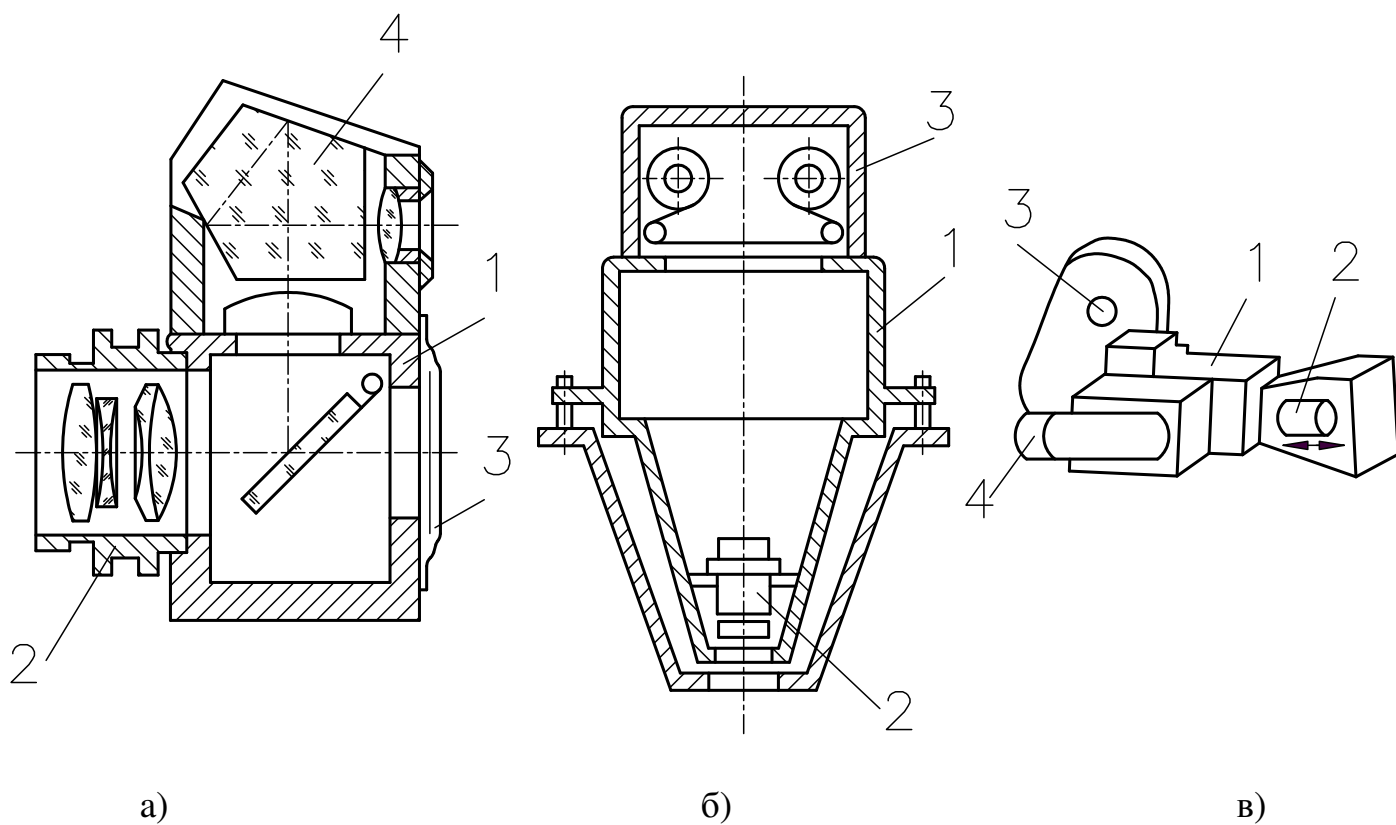


Рис. 2.5. НК фото- и киноаппаратов

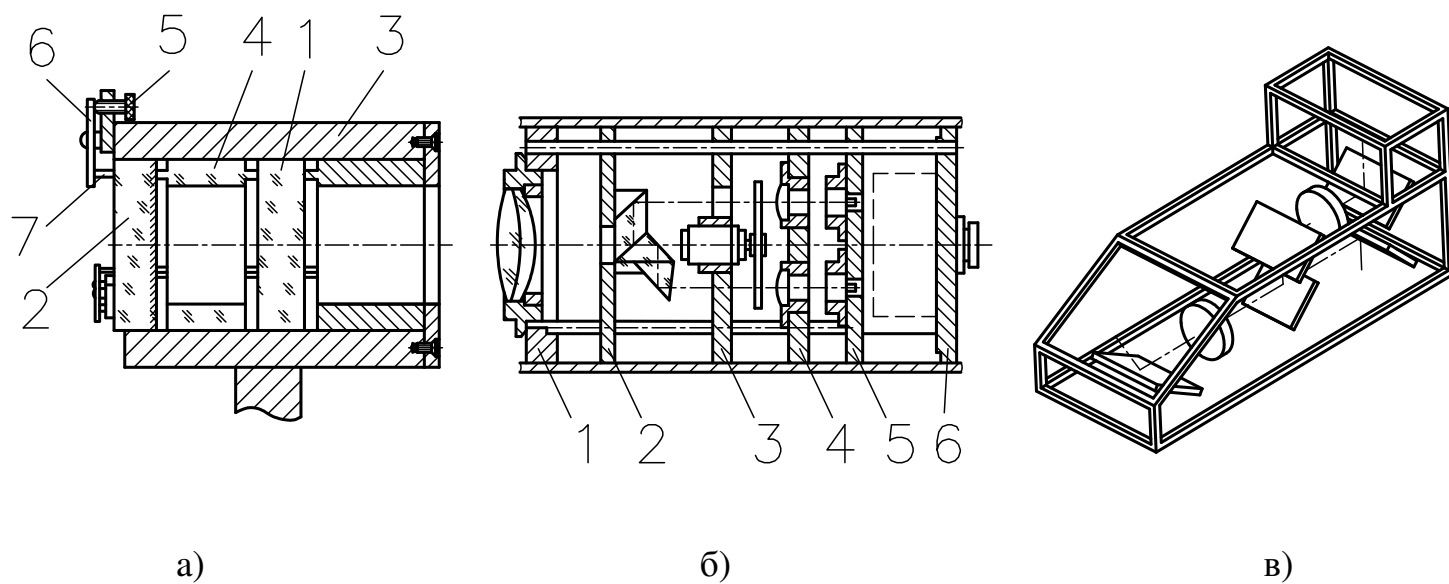


Рис. 2.6. НК интерферометра, фазового угломера и блока несущей конструкции

2.3 Стабильность НК

Стабильность характеризует устойчивость НК в пространстве и во времени, зависит от статических и динамических условий работы, скорости протекания процессов и может иметь обратимый и необратимый характер. На неё влияют и факторы окружающей среды: температура, вибрация, климатические условия, химические воздействия и т.п. Для оценки стабильности используют несколько критериев: точность, жёсткость, виброустойчивость, износоустойчивость и т.д. Часть критериев связаны друг с другом, часть – независимы.

Точность относится к числу обобщённых критериев, в число которых входят: точность функционирования ОП, точность соответствия входа и выхода прибора и т.п. Точность функционирования устанавливает степень приближения определения качественных и количественных параметров объектов или процессов с истинными значениями тех же параметров. Например, контраст интерференционной картины оценивается с помощью функции видимости:

$$V = \frac{(I_{\text{MAX}} - I_{\text{MIN}})}{(I_{\text{MAX}} + I_{\text{MIN}})}, \quad (2.1)$$

где I – интенсивность света.

При интерференционных измерениях разность хода не должна превышать $0,1\lambda$, т.е. точность функционирования интерференционных и голографических приборов $\delta_{\text{ин}}$ для видимой части спектра равна $\delta_{\text{ин}} \leq 0,05 \dots 0,1$ мкм.

При фото –, киносъёмке и других способах фиксации изображения точность функционирования $\delta_{\text{фи}}$ тесно связана с разрешающей способностью фотоносителя $\delta_{\text{ф}}$ и проекционных ОС $\delta_{\text{опр.}}$, т.е. $\delta_{\text{фи}} = \delta_{\text{ф}} + \delta_{\text{опр.}}$ и составляет 40...60 линий на 1 мм. Поэтому $\delta_{\text{фи}} \leq 0,02 \dots 0,04$ мм.

На точность функционирования влияют и смещения $\delta_{\text{зфи}}$ вдоль оптической оси, которые определяются допустимым кружком рассеяния, принимаемого равным $\delta_{\text{ф}}$. С учётом относительного отверстия K объектива

$$\delta_{\text{зфи}} = \delta_{\text{ф}} / K. \quad (2.2)$$

Для реальных приборов $\delta_{\text{зфи}} \leq 0,02 \dots 0,05$ мм.

При использовании микроскопа точность функционирования определяется в плоскости, перпендикулярной к оптической оси, и вдоль неё.

При визуальном наблюдении смещение объекта допускается не более $\delta_{\text{МВ}} \leq 0,03$ мм. При фотографировании с увеличением микроскопа $V_{\text{М}}$ смещение объекта $\delta_{\text{МФ}}$ определяется соотношением $\delta_{\text{МФ}} = \delta_{\text{ФИ}}/V_{\text{М}}$.

При $V_{\text{М}}=2000^{\times}$, $\delta_{\text{МФ}} \leq 0,02$ мкм.

Точность линейных визуальных измерений на пределе различения $\delta_{\text{МИ}} \leq 0,02$ мкм. При фотометрировании с помощью точечных диафрагм диаметром d при использовании микрообъектива с увеличением $V_{\text{О}}$ смещения в плоскости объекта $d_{\text{МФО}} = d/V$. При $d = 0,05$ мм, $V_{\text{О}}=100^{\times}$, $d_{\text{МФО}} \leq 0,5$ мкм.

Для протяжённых и гетерогенных объектов при расфокусировке допустимые смещения $\delta_{\text{ЗМП}}$ не должны превышать половины глубины резкого изображения T , равной 0,2 мкм.

При измерении координат точечных объектов, счете частиц на телевизионных счётчиках, фотометрировании гомогенных объектов допустимое смещение $\delta_{\text{ЗМГ}}$ можно увеличить. Его принимают равным глубине резкого изображения, т.е. 0,4 мкм.

Точность функционирования КИП (инструментальных микроскопов, трёх координатных измерительных машин и т.п.) в плоскости объекта может быть принята равной от 0,2 до 0,5 точности измерения или цены деления отсчётного устройства. Особенно недопустимы смещения в автоматизированных приборах. При цене деления 0,1 мкм точность функционирования $\delta_{\text{И}} \leq 0,02 \dots 0,05$ мкм. Отклонения вдоль оптической оси при фокусировании находятся в пределах до 0,1...0,2 мм и обычно не принимаются во внимание.

Допустимые смещения $\delta_{\text{ТВ}}$ зрительных труб и других астроприборов в плоскости изображения при визуальном наблюдении не должны превышать разрешающую способность, т.е. величину $\delta_{\text{ТВ}} \leq 0,7 f/D$ мкм, где f – фокус объектива, D – диаметр входного отверстия. Обычно отношение f/D находится в пределах от 10 до 20, поэтому $\delta_{\text{ТВ}} \leq 7 \dots 14$ мкм. Смещение вдоль оптической оси $\delta_{\text{ЗТ}}$ не должно превышать $\delta_{\text{ЗТ}} \leq 0,02 \dots 0,05$ мм. Точность функционирования $\delta_{\text{СП}}$ спектральных щелевых приборов в зависимости от фокуса f и диаметра коллиматорного объектива D равна $\delta_{\text{СП}} = \lambda f/D$. Обычно отношение f/D находится у щелевых приборов в пределах от 3 до 30, поэтому при $\lambda = 0,56$ мкм. допустимые смещения $\delta_{\text{СП}} \leq 1,6 \dots 16$ мкм.

В интерференционной спектроскопии точность функционирования составляет сотые доли длины волны.

Рассмотрим зависимость стабильности от скорости протекания процессов в ОП. К числу быстропротекающих процессов, измеряемых долями секунд, относятся вибрации приборов, изменение сил трения в подвижных соединениях, смещение оптической оси при деформациях и т.п.

Процессы средней скорости протекают во время непрерывной

работы ОП, их длительность составляет минуты или часы. Температурные деформации ОП (интерферометров, КИП, микроскопов, телескопов и других приборов) являются характерным обратимым процессом средней скорости.

Медленно протекающие процессы, нарушающие стабильность НК, длятся сутки и месяцы. К ним относятся: износ основных механизмов, перераспределение внутренних напряжений в деталях, загрязнение оптических деталей и поверхностей трения, коррозия, изменение свойств стекла и т.д.

Суммарное воздействие процессов на точность ОП показано на рис. 2.7.

По вертикальной оси отложены погрешности δ_0 , δ_δ , δ_c , δ_m , характеризующие соответственно начальную точность прибора и уменьшение её при быстро протекающих процессах, процессах средней скорости и медленных. Прибор достигает предельной погрешности $\delta_{\max}$ через промежуток времени T , поэтому в конструкции предусматривают компенсацию или устранение погрешностей, возникающих при длительной эксплуатации, например, старение корпусных деталей, удобный ремонт и замену деталей и т.д.

Приведённые выше значения смещений НК имеют ориентировочный характер. Их анализ должен выполняться при разработке каждого изделия.

Допустимые величины оценочных смещений НК приведены в табл. 2.1.

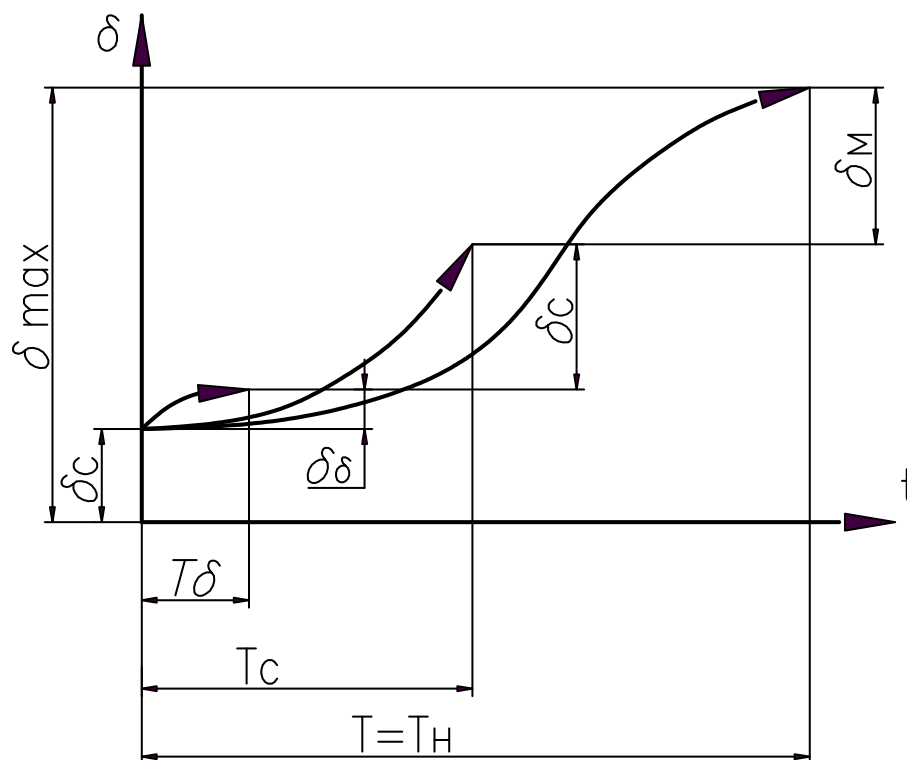


Рис. 2.7. Стабильность оптических приборов

Таблица 2.1

Тип ОП	Вид работы на приборе	Смещение по координатам, мкм	
		X и Y (перпендикулярно к оптической оси)	Z (вдоль оптической оси)
Интерферометры	Измерение смещений полос или разности хода	0,02...0,05	0,03
	Измерение искривления полос	0,03...0,1	
Голографические приборы		0,08	0,08
Приборы для фиксации изображения	Фотографирование, киносъёмка, видеосъёмка	20...40	20...50
Световые микроскопы	Визуальное наблюдение, в том числе и с использованием ЭОП	30	0,2...0,4
	Линейные измерения на пределе различения	0,02	
	Фотометрирование зондом	0,5	
КИП	Линейные измерения	0,02...0,5	100...200
Телескопические приборы	Визуальное наблюдение	2	20...50
	Стабилизация изображения космических телескопов	5	
Спектральные приборы	Использование диспергирующих элементов	2	
	Использование интерференции	0,02...0,05	
Оптические преобразователи перемещения	Растровые	0,1	
	На голографических решетках	0,01	
	Интерферометрические	0,02	

2.4. Жёсткость НК

Узлы и детали НК должны обладать такой жёсткостью, чтобы в течение всего периода эксплуатации они сохраняли способность сопротивляться разрушению и возникновению недопустимых упругих или остаточных деформаций.

Деформации НК и узлов ОП влияют на положение световых пучков, что приводит к искажениям оптического сигнала. Влияют они и на механические свойства узлов – точность перемещений, виброустойчивость ОП и т.д.

Деформации δ , возникающие в ОП, имеют упругий и остаточный характер. Упругие деформации δ_y исчезают после снятия нагрузки, а остаточные $\delta_{ост}$ деформации сохраняются. Величина упругих деформаций растёт с ростом нагрузки, а остаточные при этом меняются мало (предполагается, что величина нагрузки не приводит к разрушению приборов).

Таким образом

$$\delta = \delta_y + \delta_{ост}. \quad (2.3)$$

Общая деформация δ включает следующие деформации СЧ:

1) объёмные деформации $\delta_{об}$ корпусов, стоек, направляющих и других деталей, определяемые в соответствии с теорией сопротивления материалов;

2) контактные деформации δ_k в местах сопряжения деталей при касании по точке, линии или поверхности, называемые также деформациями стыков;

3) деформации смазочных слоёв $\delta_{см}$ в подвижных соединениях, включающие упругую и остаточную составляющие;

4) деформации от зазоров δ_z в подвижных соединениях, необратимые деформации деталей, обусловленные наличием больших контактных напряжений, микронеровностей и т.п., имеющие остаточный характер.

Таким образом

$$\delta = \sum \delta_{об} + \sum \delta_k + \sum \delta_{см} + \sum \delta_z. \quad (2.4)$$

Свойство конструкций препятствовать появлению упругих деформаций δ_y под действием нагрузки P называется жёсткостью конструкции C .

Число элементарных деформаций составляет, как правило, десятки единиц даже в сравнительно простых механизмах. Так в неподвижном соединении, включающем всего три детали (основание, стойку и хотя бы два крепёжных элемента), число деформаций – не менее восьми –

– десяти. Таким образом, общая деформация сложного механизма образуется в результате суммирования достаточно большого числа ($n > 5$) независимых элементарных смещений, каждое из которых оказывает малое влияние. Тогда в соответствии с центральной предельной теоремой, используемой в математической статистике, общая деформация должна быть распределена по закону, близкому к нормальному, и связь между деформациями и нагрузками должна быть близка к линейной. Поэтому, под статической жёсткостью сложного механизма или иной сложной конструкции понимается отношение

$$C = 1/\delta \times P = k \times P, \quad (2.5)$$

где C – жёсткость конструкции, Н/мм;
 P – усилие, приложенное к механизму, Н;
 δ – деформация механизма в направлении действия силы, мм;
 k – коэффициент податливости, мм^{-1} , $k = 1/\delta$.

Таким образом, сложный механизм в отношении жёсткости можно рассматривать как упругое тело, в котором деформация пропорциональна нагрузке (обобщённый закон Гука).

Кроме поступательных деформаций, характеризующихся линейными смещениями δ , в приборах могут существовать и угловые смещения. В этом случае угловая жёсткость $C_\varphi = M/\varphi$,
 где M – момент, Н·мм;

φ – угол поворота, ... °.

Смещения возникают от действия внешних и внутренних сил.

Внешние усилия появляются при различных манипуляциях оператора на приборе, при воздействии других механизмов, совместно с которыми используются ОП, при ветровых нагрузках и т.п.

Внутренние усилия возникают в механизмах приборов вследствие работы приводов, изменения положения центра тяжести при перемещении достаточно больших узлов (предметных столов, трубы телескопа и т.п.), неравномерности движения кинематических звеньев, нагрева приборов.

Усилия, необходимые для приведения механизма в действие или возникающие в лабораторных ОП, обычно находятся в пределах 1...30 Н.

Таким образом, мы имеем исходные данные для определения жёсткости в плоскости, перпендикулярной к оптической оси по координатам X и Y , и вдоль оси по координате Z . Значения жёсткости для разных условий работы с учётом условий, действующих в механизмах приборов в процессе исследования, приведены в табл. 2.2. При этом величина смещений, приведённых ранее, уменьшена в два раза.

Таблица 2.2

Тип ОП	Вид работы на приборе	Жёсткость по координатам, Н/мм	
		Х и Y	Z
Интерферометры	Измерение смещения или разности хода	50000... ...1000000	33000... ...300000
	Измерение искривления полос	25000... ...500000	
Голографические приборы		20000... ...400000	20000... ...200000
Приборы для фиксации изображения	Фотографирование и киносъёмка	200...1000	100...500
Световые микроскопы	Визуальное наблюдение, в том числе с использованием ЭОП	150...500	10000... ...70000
	Линейные измерения на пределе различения	80000... ...1250000	При измерении протяжённых объектов : 10000...70000
	Фотометрирование зондом	7000...54000	Для гомогенных объектов 5000...35000
	Микрофотографирование, микропроекция	30000... ...250000	14000... ...100000
КИП	Линейные измерения	50000... ...10000000	1000...4000
Зрительные трубы	Визуальное наблюдение	4000...20000	
Спектральные приборы	Использование диспергирующих элементов	4000... 200000	33000... 300000
	Использование интерференции	50000... 1000000	

Наименьшие значения жёсткости соответствуют усилиям в пределах от 1 до 2 Н, наибольшие – усилиям от 20 до 100 Н.

Из данных таблицы можно сделать следующие выводы:

- жёсткость по осям X и Y имеет большие пределы изменений и

зависит от вида работы ;

– жёсткость вдоль оптической оси изменяется значительно меньше (исключение составляют приборы, в которых используется интерференция света).

Если конструкция прибора обеспечивает указанное значение жёсткости, исследования проводятся при оптимальных условиях. Таблица имеет информационный характер и значения жёсткости следует уточнять для конкретных приборов.

2.5. Исследование жёсткости

Для измерения смещений используют стрелочные приборы, оптические приборы для линейных измерений, фотографические и тензометрические методы. Нагрузки создаются гирями или с помощью пружинных динамометров. Для большинства ОП достаточно изменения нагрузок в пределах до 100 Н. Смещения измеряются в направлении действия сил или по координатным осям. Нагрузка изменяется от 0 до выбранного значения. Число интервалов нагрузки не менее четырех. Рекомендуется многократное (не менее трёх раз) измерение жёсткости, особенно для подвижных соединений. В этом случае при первом измерении определяют наибольшие остаточные смещения. Остаточные смещения особенно чётко выявляются при изменении направления нагрузки.

По результатам измерения деформаций при нагрузке и разгрузке строят кривые, которые образуют гистерезисную петлю.

Для эксцентричных нагрузок, что характерно для многих узлов, петля имеет вид, представленный на рис. 2.8а.

На участке ОА происходит выборка зазоров, преодоление сил трения в узле и сил противодействия смазочных слоёв. На отрезке АВ узел работает как упругая система. При уменьшении усилий для преодоления сил трения на участке БВ необходимы дополнительные силы, которые вызывают изменение наклона линии. На участке ВГ происходит упругий возврат механизма в исходное положение.

Через некоторое время после снятия нагрузки за счёт возвратных деформаций обычно происходит уменьшение остаточного смещения ОГ на величину ГД. При повторных нагружениях вследствие упрочнения материала, смятия микронеровностей и т.п. жёсткость механизмов, как правило, возрастает (рис. 2.8б).

Разница в смещениях между первым и последующим испытаниями достигает 30%. При изменении нагрузки от -Р до +Р петля имеет вид, показанный на рис. 2.8в.

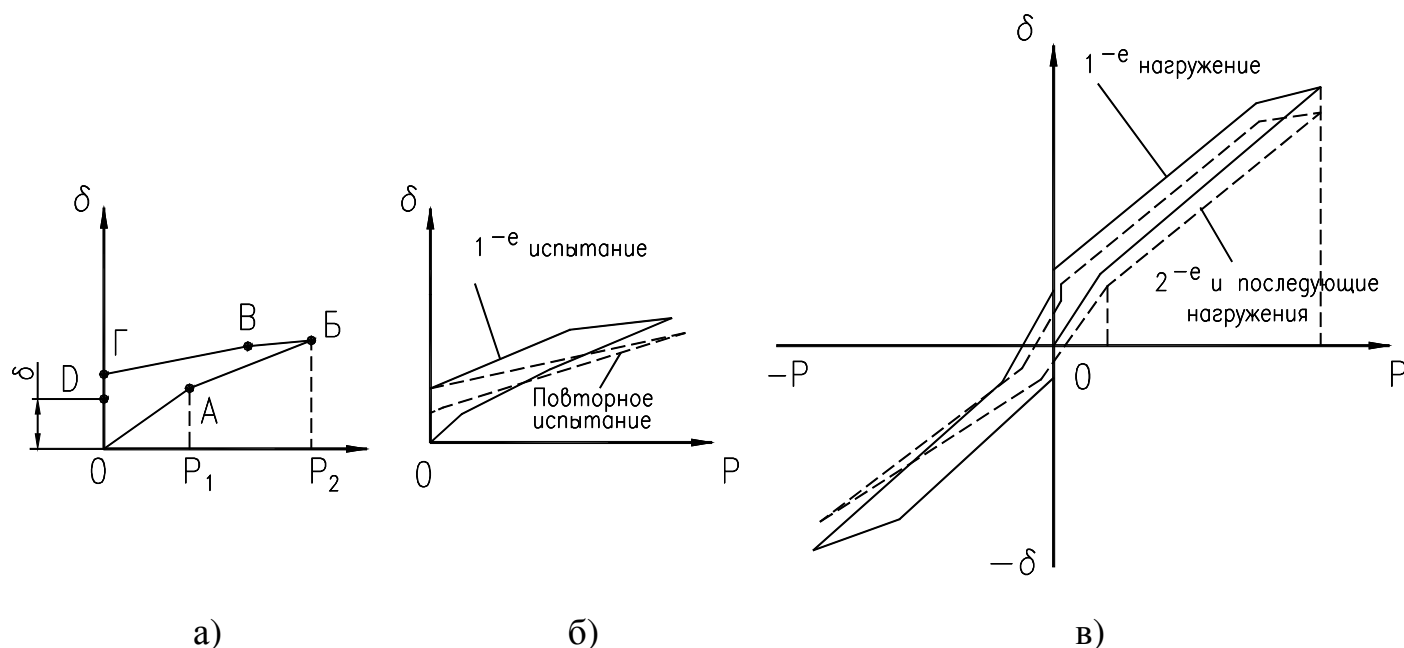


Рис. 2.8. Гистограммы жесткости механизмов

Площадь гистерезисной петли характеризует работу сил трения, затраты энергии на деформацию смазочных слоёв, микронеровностей и т.п. в сопряжениях сложного механизма.

Для неподвижных узлов участки ОА, БВ, ГД и площадь петли весьма малы, в то время как для подвижных соединений они могут быть достаточно велики.

Величина упругих смещений узлов (участок АБ на рис. 2.8а) значительно превышает величину остаточных смещений.

На рис. 2.9 приведены результаты исследования сложных механизмов и НК.

Зависимость между нагрузками и деформациями по осям X, Y и Z для НК консольного типа представлена на рис. 2.9а. Стойка 1 имеет фокусирующее перемещение по основанию 2, имеющего ширину 32 мм.

Оптическая ось прибора смещена относительно опорной плоскости основания на 108 мм.

На рис. 2.9б изображена круговая диаграмма для усилий в 10 и 20 Н, которая демонстрирует деформации подвижной стойки во всех направлениях.

На рис. 2.9в, г представлены результаты исследований консольной конструкции с шариковыми направляющими.

На рис. 2.9д приведена арочная порталная НК. У неё оптическая ось ОО совпадает с осью симметрии конструкции. Её жёсткость на порядок превышает жёсткость консольных конструкций, приведённых выше.

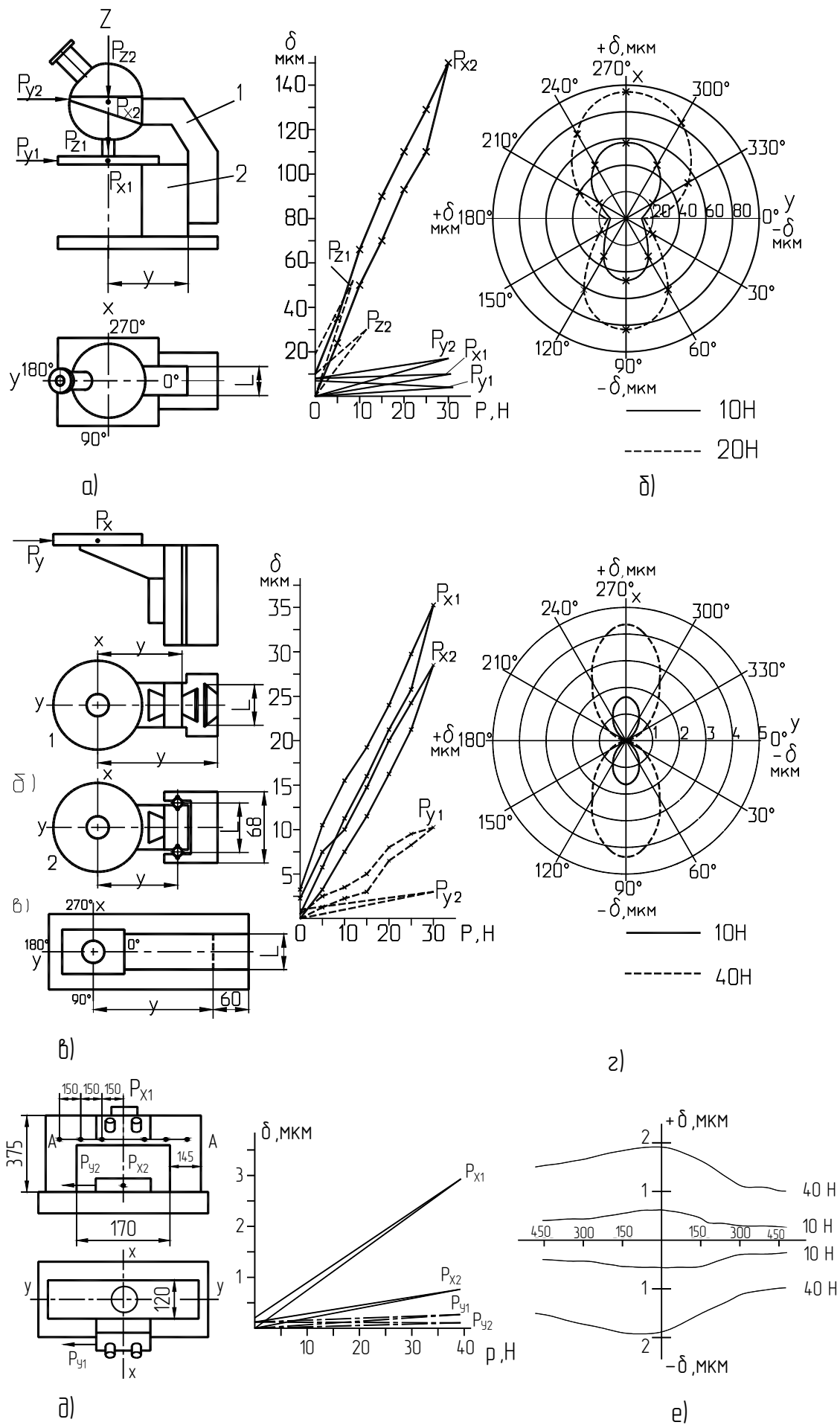


Рис. 2.9. Результаты испытаний узлов ОП

На рис. 2.9е показаны смещения оптической оси при приложении усилий по линии нагрузки А-А через 150 мм для разных нагрузок.

Как видно из графиков, зависимость деформаций от смещений близка к линейной. Уравнения прямых линий, характеризующих линии нагрузки и разгрузки гистерезисной петли жёсткости, имеют вид

$$\delta_H = 1/C \times P_H \text{ и } \delta_P = \delta_{\text{ост}} + 1/C \times P_P. \quad (2.6)$$

При обработке результатов измерения жёсткость C определяется зависимостью

$$C = \frac{n \Sigma P^2 - (\Sigma P)^2}{n \Sigma P \delta - \Sigma P \delta}, \quad (2.7)$$

а остаточные смещения $\delta_{\text{ост}}$ – зависимостью

$$\delta_{\text{ост}} = \frac{\Sigma P^2 \Sigma \delta - \Sigma P \Sigma P \delta}{n \Sigma P^2 - (\Sigma P)^2}. \quad (2.8)$$

Обработка результатов измерений жёсткости обычно производится на ПК.

Исследования жёсткости НК отечественных и зарубежных микроскопов показали следующее:

1) Жёсткость большинства серийных микроскопов, особенно имеющих подвижные соединения, опорные поверхности которых смещены относительно оптической оси, ниже значения жёсткости, определённой для различных условий работы (см. табл. 2.2);

2) Жёсткость неподвижных и подвижных узлов, имеющих направляющие, расположенные симметрично оптической оси, как правило, обеспечивает минимальный теоретический предел для большинства видов исследований. Жёсткость по оси Z подвижных узлов недостаточна и не обеспечивает даже минимальную жёсткость при визуальном наблюдении. Наибольшей жёсткостью обладает арочная конструкция штативов, имеющая неподвижные тубусодержатель и предметный столик.

3) Остаточные смещения неподвижных узлов и направляющих с трением качения не превышают 2...5 мкм и вполне обеспечивают сохранение необходимой центрировки системы объект – объектив.

Направляющие скольжения, особенно имеющие эксцентричное расположение относительно оптической оси, могут увеличить расцентровку оптической системы до 30 мкм, что недопустимо. При конструировании органов управления и приводных механизмов узлов

необходимо с помощью круговых диаграмм устанавливать направление максимальной жёсткости и совмещать с ним направление действующих усилий.

Следует отметить, что в последних моделях микроскопов серьёзное внимание уделяется повышению жёсткости конструкции.

2.6. Аналитическое определение жесткости

Детали узлов и приборов могут образовывать последовательное, параллельное и смешанное соединения упругих элементов. Рассмотрим последовательное соединение деталей (рис. 2.10а). Узел состоит из корпуса 1, основания 2, направляющей 3 и кронштейна 4. Эту конструктивную схему заменим схемой соединения упругих элементов, причём каждый элемент конструкции представим в виде пружины, характеризуемой жёсткостью C_j и прогибом δ_j .

При последовательном соединении СЧ общая их деформация δ_0 будет равна сумме деформаций отдельных деталей δ_j

$$\delta_0 = \sum_{j=1}^n \delta_j. \quad (2.9)$$

Так как смещение $\delta = P/C$, то в общем случае

$$\frac{1}{C_0} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{C_j}, \quad C_0 = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{C_j}}. \quad (2.10)$$

Рассмотрим параллельное соединение СЧ (рис. 2.10 б), состоящее, например, из планки 1, закреплённой винтами 2 к основанию 3.

При параллельном соединении элементов

$$C_0 = \sum_{j=1}^n C_j. \quad (2.11)$$

При смешанном соединении СЧ, показанном на рис. 2.10в, детали с жёсткостями C_1 и C_2 соединены параллельно, т.е. общая жёсткость этих деталей $C_{1,2} = C_1 + C_2$.

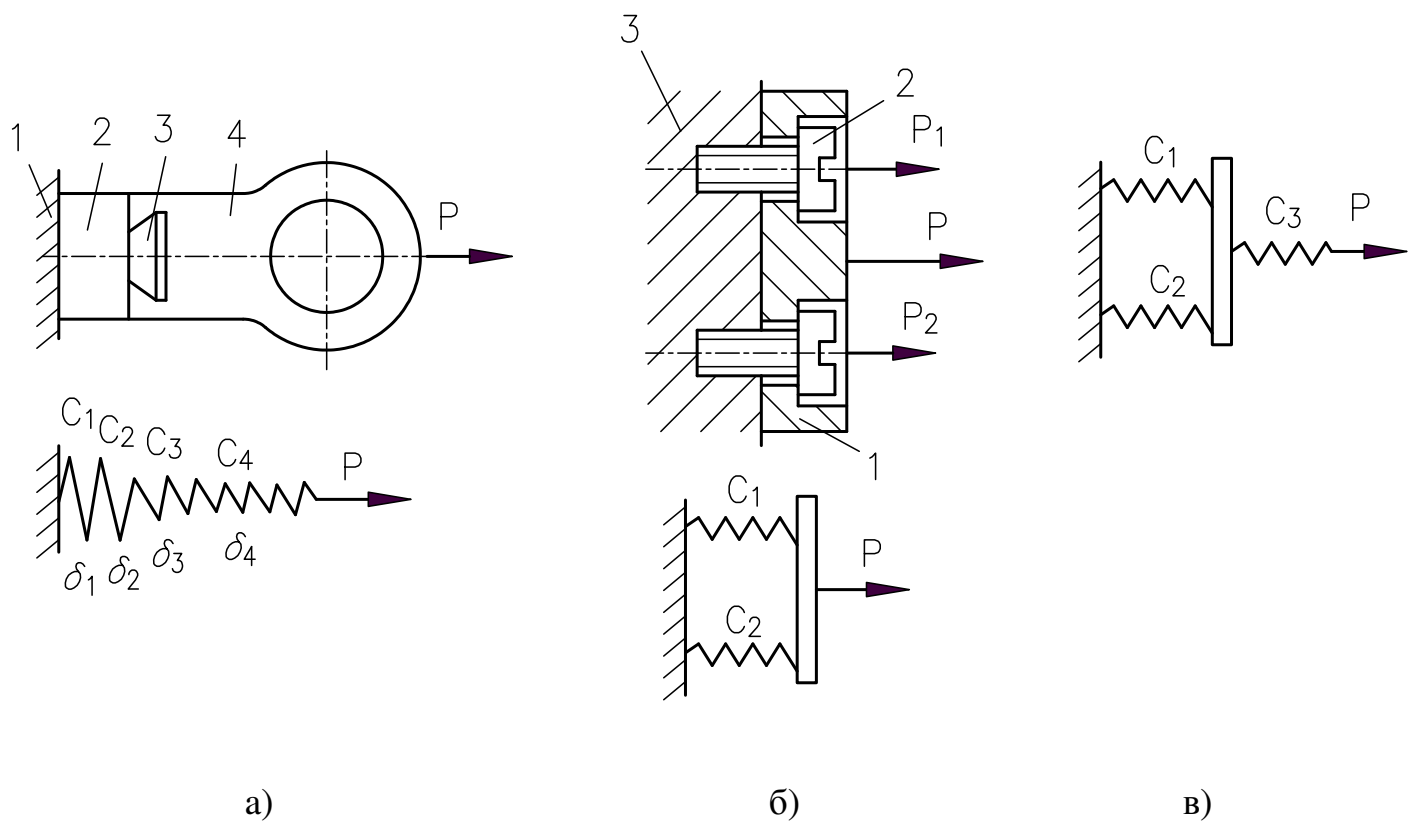


Рис. 2.10. Схемы соединений упругих элементов

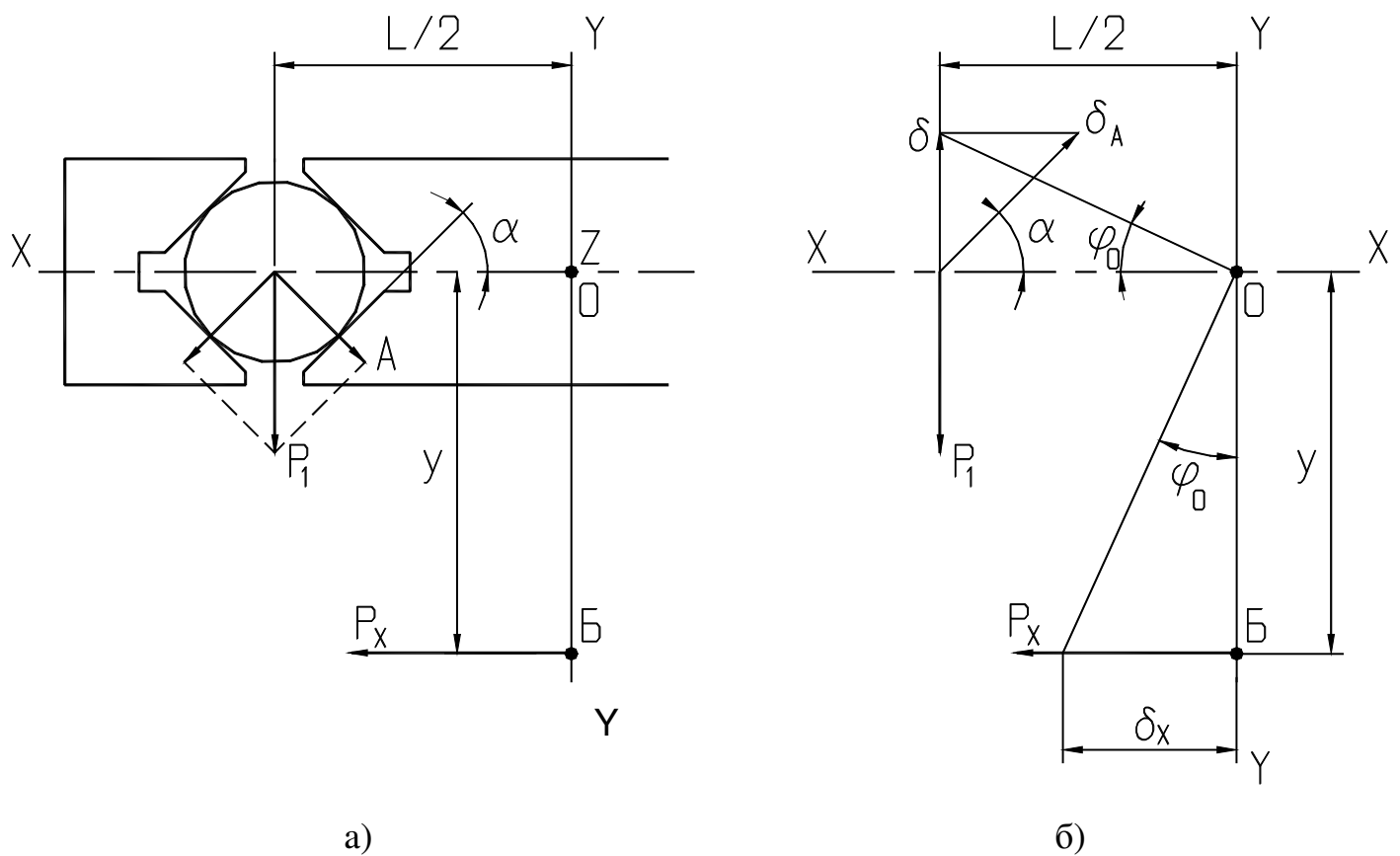


Рис. 2.11. Расчет жесткости направляющих качения

Для жёсткостей $C_{1,2}$ и C_3 , соединённых последовательно, получим

$$C_0 = \frac{1}{1/C_{1,2} + 1/C_3}.$$

Для предварительной оценки вариантов конструкции узла или подвижного соединения полезно составить тождество, характеризующее баланс упругих перемещений

$\delta_{ОБ1} = \delta_{ОБ2}$, где $\delta_{ОБ1}$ – общее смещение 1-го варианта конструкции;
 $\delta_{ОБ2}$ – общее смещение 2-го варианта конструкции.

С учётом составляющих смещений формула имеет вид

$$\sum \delta_{O1} + \sum \delta_{K1} + \sum \delta_{31} + \sum \delta_{CM1} = \sum \delta_{O2} + \sum \delta_{K2} + \sum \delta_{32} + \sum \delta_{CM2}. \quad (2.12)$$

Логический анализ этого тождества часто позволяет сделать вывод о рациональной схеме.

Как уже отмечалось, экспериментальные исследования (см. рис. 2.9) показали, что наименьшую жёсткость имеют подвижные соединения, поэтому рассмотрим расчёт жёсткости направляющих качения и скольжения. Большое влияние на жёсткость направляющих оказывают погрешности изготовления тел качения, плоскостей скольжения и извёрнутость направляющих.

При определении жёсткости шариковых направляющих, на основании эксперимента принимают, что зависимость между эксцентричными нагрузками и смещениями близка к линейной. Поэтому упругое смещение направляющей δ (мкм.) под действием нагрузки можно определить зависимостью

$$\delta = K_{Ш} \times P, \quad (2.13)$$

где $K_{Ш}$ – коэффициент податливости шариков, мкм/Н.

Перемещения в роликовых направляющих определяются формулой

$$\delta = K_P \times q, \quad (2.14)$$

где K_P – коэффициент податливости, мкм см/Н;

q – погонная нагрузка на единицу длины ролика, действующая по нормали к плоскости направляющей, Н/см.

Погонная нагрузка

$$q = P/nb, \quad (2.15)$$

где P – нагрузка, Н;
 n – число роликов;
 b – длина роликов, см.

Для обычной прямолинейности направляющих (до 0,01 мм.), разномерности тел качения (0,001...0,002 мм), используемых диаметров шариков (3...8 мм.) и величины предварительного натяга коэффициент $K_{ш}$ можно принять равным 0,15...0,25 мкм/Н, коэффициент K_p равным 0,05...0,1 мкм×см/Н.

Дальнейший расчёт смещений включает в себя:

- определение моментов, реакций направляющих и средних нагрузок на шарики или ролики;
- определение углов поворота в направляющих;
- определение упругих перемещений в искомых точках.

Рассмотрим расчёт шариковых направляющих в простейшем случае при одной действующей нагрузке (рис. 2.11).

Пусть к шариковой направляющей (рис. 2.11а) в точке Б приложено усилие P_x на расстоянии Y от оси направляющей. Реакция A по нормали к плоскости направляющей будет равна $A = P_1 \cdot \cos \alpha$ и соответствующая упругая деформация (см. рис. 2.11 б)

$$\delta_A = K_{ш} \times A = K_{ш} \times P_1 \times \cos \alpha.$$

$$\text{Деформация вдоль оси } YY \delta = \delta_A \times \cos \alpha = K_{ш} \times P_1 \times \cos^2 \alpha.$$

Обычно в направляющих угол α равен 45° , тогда $\delta = 0,5 K_{ш} \times P_1$.

Из рис. 2.11 б следует, что $P_1 = 2 P_x \times Y / L$.

Поскольку с каждой стороны направляющей расположено по Z шариков, то деформация уменьшится в Z раз и составит

$$\delta = \frac{P_x \cdot Y \times K_{ш}}{L \times Z}. \quad (2.16)$$

Угол поворота $\varphi_0 \approx \tan \varphi_0$,

$$\varphi_0 = \frac{\delta}{L/2} = \frac{2 P_x \times Y \times K_{ш}}{L^2 Z}.$$

Смещение точки Б приложения силы

$$\delta_x = \varphi_0 \cdot Y = \frac{2 P_x \cdot Y^2 \cdot K_{ш}}{L^2 Z}. \quad (2.17)$$

Отсюда жёсткость направляющей по оси ХХ в точке Б

$$C_x = \frac{P_x}{\delta_x} = \frac{L^2 \times z}{2Y^2 \times K_{III}} . \quad (2.18)$$

Таким образом, на жёсткость направляющей сильное влияние оказывает консольное приложение усилий (вылет Y) и размер базы L . В предельном случае, с целью создания направляющей, имеющей максимальную жёсткость, следует стремиться уменьшить Y до 0, а L увеличить до бесконечности. Этому случаю соответствуют цилиндрические направляющие, у которых оптическая ось совмещена с осью цилиндра.

Дополнительное параллельное смещение по оси XX точки B от усилия P_x при эксцентричных нагрузках весьма мало и определяется соотношением

$$\delta_{II} = \frac{P_x \times K_{III}}{2z} .$$

$$\text{Жёсткость } C_{II} = 2z / K_{III} . \quad (2.19)$$

Коэффициент 2 учитывает касание шариков в двух точках направляющей. Если усилие P_y действует по оси YY , то жёсткость направляющих по оси YY

$$C_y = 2z / K_{III} . \quad (2.20)$$

Жёсткость по оси Z при действии на направляющую нагрузки P_z в точке, расположенной на вылете Y в середине направляющей, может быть определена из отношения

$$C_z = \frac{z H^2}{6K_{III} Y^2} , \quad (2.21)$$

где H – длина сепаратора.

При расчётах учитывают, кроме смещений направляющих, податливость других звеньев конструкции (креплёжных винтов направляющих, объёмные деформации консолей и т.д.).

Формулы упругих деформаций в наиболее часто используемых направляющих для произвольно расположенных точек приложения нагрузок приведены в табл. 2.3.

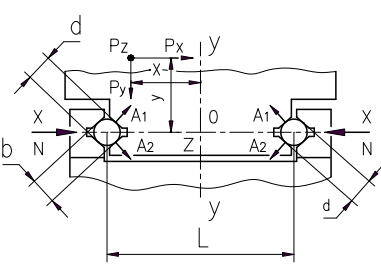
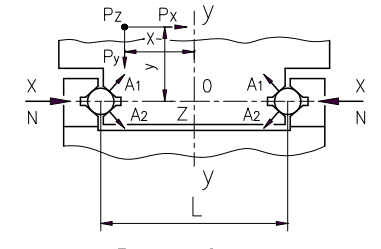
Расчёт на жёсткость направляющих скольжения типа «ласточкин хвост», а также узлов, имеющих установочные места такого же типа, производят, ввиду наличия эксцентричных нагрузок, большой площади контакта, при предположении линейной зависимости между нормальным давлением на грань σ , и смещением, т.е.

$$\delta = K\sigma, \quad (2.22)$$

где K – коэффициент контактной податливости, мкм/МПа.

Значение коэффициента для латунных деталей можно считать равным 7...9 мкм/МПа.

Таблица 2.3

Тип направляющих	Моменты, воспринимаемые направляющими, Н/см	Углы поворота в направляющих, мкм / см	Упругие деформации, мкм	
			Точки 0	Точки с координатами X, Y
 Шариковые	$M_x = P_y Z \pm P_z Y$ $M_y = P_x Z \pm P_z X$ $M_z = P_y X - P_x Y$	$\varphi_x = \frac{6M_x K_{III}}{H^2 z}$ $\varphi_y = \frac{6M_y K_{III}}{H^2 z}$ $\varphi_z = \frac{2M_z K_{III}}{L^2 z}$	$\delta_{x0} = \frac{P_x K_{III}}{2z}$ $\delta_{y0} = \frac{P_y K_{III}}{2z}$	$\delta_x = \delta_{x0} + \varphi_z Y \pm \varphi_y Z$ $\delta_y = \delta_{y0} + \varphi_z X \pm \varphi_x Z$ $\delta_z = \varphi_x Y + \varphi_y Z$
 Роликовые	$M_x = P_y Z \pm P_z Y$ $M_y = P_x Z \pm P_z X$ $M_z = P_y X - P_x Y$	$\varphi_x = \frac{6M_x K_p}{bH^2 z}$ $\varphi_y = \frac{6M_y K_p}{bH^2 z}$ $\varphi_z = \frac{2M_z K_p}{bL^2 z}$	$\delta_{x0} = \frac{P_x K_p}{2bz}$ $\delta_{y0} = \frac{P_y K_p}{2bz}$ $b \approx 0,35d$	$\delta_x = \delta_{x0} + \varphi_z Y \pm \varphi_y Z$ $\delta_y = \delta_{y0} + \varphi_z X \pm \varphi_x Z$ $\delta_z = \varphi_x Y + \varphi_y X$

Рассмотрим сначала деформации с учётом работы основных плоскостей направляющих. Угол поворота φ_0 точки Б (рис.2.12 а) определяется соотношением

$$\varphi_0 = \frac{\delta}{L/2} \quad \text{или} \quad \varphi_0 = \frac{2K\sigma}{L}.$$

Далее из рис. 2.12 а

$$\sigma = \frac{A}{S}, \quad A \frac{L}{2} = P_X Y, \quad A = \frac{2P_X Y}{L},$$

где S – площадь контакта.

Отсюда

$$\sigma = \frac{2P_X Y}{LS}, \quad \text{угол поворота} \quad \varphi_0 = \frac{4KP_X Y}{L^2 S}. \quad (2.23)$$

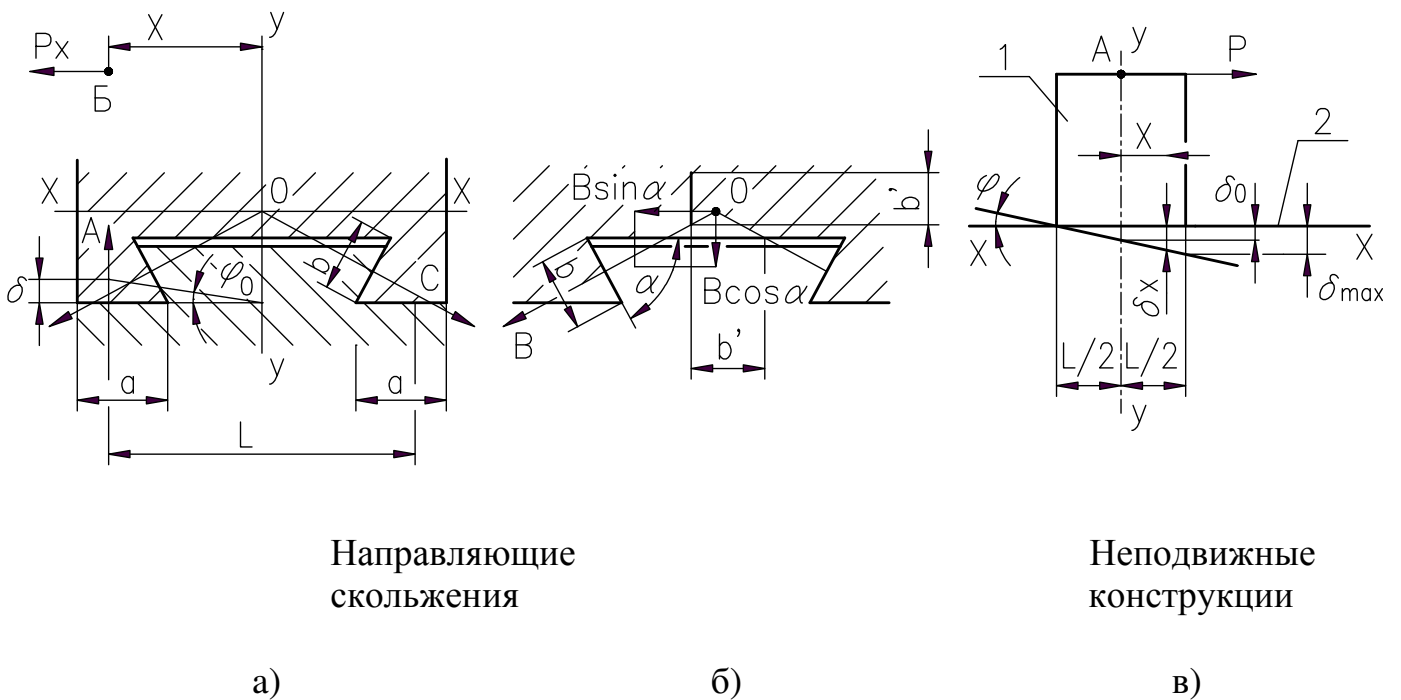


Рис. 2.12. Расчет жесткости

Влияние наклонной грани «ласточкиного хвоста» можно учесть с помощью приведённой ширины грани b' (рис. 2.12 б), равной

$$b' = b \cos^2 \alpha,$$

где α – угол между наклонной и приведённой гранями.

Обычно приведённая ширина b' и соответственно приведённая площадь составляют около 20% площади основных граней.

Поэтому жёсткость по оси XX в точке Б

$$C_X = \frac{1,2P_X}{\delta_X} = \frac{1,2P_X}{\varphi_0 Y} = \frac{0,3L^2 S}{KY^2} . \quad (2.24)$$

Таким образом, жёсткость направляющих скольжения весьма зависит от вылета и базы направляющих.

Жёсткость по оси Y

$$C_Y = S/K . \quad (2.25)$$

Рассмотрим неподвижную консоль (рис. 2.12 в), встречающуюся во многих НК. Стойка 1 неподвижно соединена с основанием 2 и нагружена усилием Р, действующим на расстоянии Y от основания. Момент М, действующий на стойку $M = PY$.

Условие равновесия прямоугольного соединения шириной b и длиной L имеет вид

$$M = b \int_{-L/2}^{+L/2} \sigma_X X dX , \quad (2.26)$$

где σ_X – давление в сечении X.

Из экспериментов известно, что при эксцентричном нагружении деформация $\delta = K\sigma$, где K – коэффициент податливости, равный 2...2,5 мкм/мп для стальных деталей .

Удельное давление в сечении X $\sigma_X = \delta_X / K$ и перемещение в сечении X $\delta_X = \delta_0 + \varphi X$,

$$\text{где } \delta_0 = \varphi \frac{L}{2} \quad \text{и} \quad \sigma_X = \frac{\varphi L / 2 + \varphi X}{K} .$$

Тогда

$$M = b \int_{-L/2}^{+L/2} \frac{(\varphi L / 2 + \varphi X)}{K} X dX . \quad (2.27)$$

После преобразований получим $M = b\varphi L^3 / 12K = S\varphi L^2 / 12K$, где $S = bL$ – площадь соприкосновения.

Угол поворота

$$\varphi = \frac{12PYK}{SL^2} .$$

$$\text{Смещение точки A} \quad \delta_A = \varphi y = \frac{12PY^2 K}{SL^2} . \quad (2.27 \text{ a})$$

$$\text{Жёсткость в точке A} \quad C_A = \frac{P}{\delta_A} = \frac{SL^2}{12KY^2} . \quad (2.28)$$

Таким образом, и в неподвижном соединении необходимо с целью повышения жёсткости увеличивать опорную базу L и уменьшать вылет Y .

Анализируя формулы, определяющие жёсткость, можно сделать следующие выводы:

1) Существенное влияние на жёсткость по оси X оказывают смещение оптической оси относительно опорных поверхностей и размер базы между опорными поверхностями. Поэтому конструктор должен стремиться совместить оптическую ось прибора с центром симметрии конструкции и увеличить базу опорных поверхностей.

2) Жёсткость по оси Y при эксцентричном нагружении обычно значительно выше жёсткости по оси X , так как в реальных механизмах $L^2 / Y^2 < 0,2$.

Эти выводы подтверждают и экспериментальные результаты.

2.7. Влияние жёсткости на функционирование ОП

Если выходные параметры ОП, например, центрировка системы «объект – объектив», связаны с координатами X , Y и Z объекта функциональной зависимостью $F = f(x, y, z)$, то всякие изменения координат X , Y и Z вызывают отклонения F . Если изменения координат взаимонезависимы и функция непрерывна, то полный дифференциал dF определяется как

$$dF = \frac{dF}{dx} dx + \frac{dF}{dy} dy + \frac{dF}{dz} dz .$$

Перейдя к конечным приращениям, получим

$$\Delta F = F_x' \Delta x + F_y' \Delta y + F_z' \Delta z$$

или

$$\Delta F = F'_x \frac{P_x}{C_x} + F'_y \frac{P_y}{C_y} + F'_z \frac{P_z}{C_z} . \quad (2.29)$$

Весьма влияет жёсткость и на параметры функциональных перемещений. На измерительные перемещения жёсткость влияет непосредственно, поскольку она определяет стабильность центра координат.

Сложнее учесть роль жёсткости при установочном перемещении, задача которого состоит в совмещении изображения объекта с какой-либо меткой, шкалой или зондом в поле зрения.

При установочных перемещениях скорость движения узлов доходит до 10...15 мкм/с и даже до 0,2...0,5 мкм/с.

Общий случай взаимодействия механизмов, используемых для установочных перемещений, представлен на рис. 2.13 а.

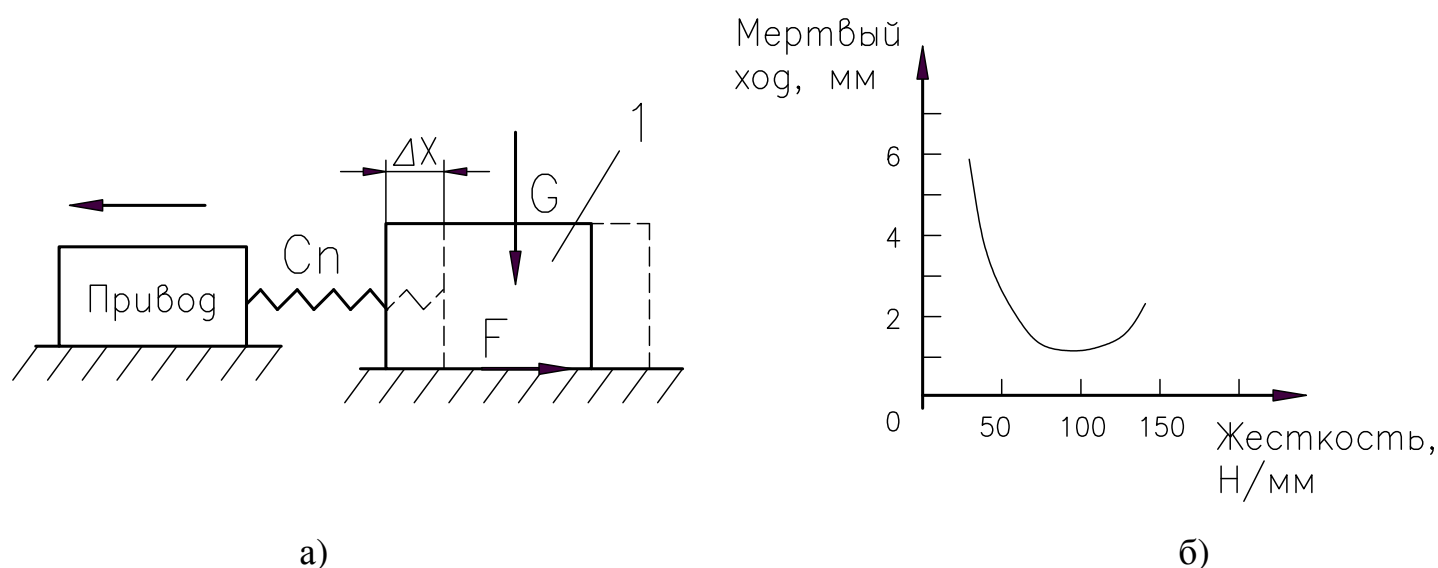


Рис. 2.13. Связь точности и жесткости механизмов

Ведущее звено (привод) соединено с ведомым звеном 1 связью, имеющей жёсткость C_n . Уравнение движения звена 1 имеет вид

$$mx'' + h_c x' - C_n x - G\mu = 0,$$

где x – перемещение,
 m – масса звена 1,
 h_c – коэффициент сил сопротивления,
 C_n – жёсткость привода,
 G – нагрузка на звено 1, включающая вес и силу затяжки

направляющих,
 μ – коэффициент трения.

В начале движения привода ведомое звено 1 некоторое время остаётся неподвижным, пока сила упругости $P = C_n \Delta x$ не преодолеет силу трения покоя. Произойдёт скачок ведомого звена 1. Звено 1 остановится и далее скачкообразный процесс перемещения звена 1 (процесс фрикционных автоколебаний) повторится.

Приравнявая $P = F$, найдём величину скачка

$$\Delta x = \frac{G\mu}{C_n} . \quad (2.30)$$

Из формулы следует, что уменьшение сил трения и увеличения жёсткости привода позволяет уменьшить Δx , т.е. уменьшить неравномерность движения.

Существенное влияние на неравномерность движения направляющих скольжения оказывает выбор смазок. Сейчас выпускаются антискачковые, демпфирующие смазки, применение которых в несколько раз повышает точность совмещения объекта с метками в поле зрения. Так, исследования демпфирующих смазок ф. Nue (США) 774, 767 А и PG-44Р различной вязкости показали, что чем выше вязкость смазки, тем точнее производится совмещение. Однако, очень высокая вязкость смазки приводит к значительному увеличению усилий, необходимых для перемещения направляющих. Поэтому целесообразно направляющие скольжения смазывать смазками средней вязкости марок 774L, 774, 774Н, которые позволяют совмещать на микроскопе за одну наводку объект с меткой с точностью 0,5 – 1 мкм.

Повышение качества сборки в такой же степени, как и конструкция, определяет равномерность движения, так как сборка в значительной степени может изменить силы трения за счёт равномерности величины затяжки направляющих и жёсткость привода при пригонке деталей, регулировке зазоров и т.д.

Экспериментальные исследования точных механизмов показали, что существует также тесная связь между жесткостью направляющих качения и мёртвым ходом механизма (рис. 2.13 б).

Обычно для повышения жёсткости сборщики стараются сжать боковые планки направляющих (см. рис.2.11). Но при плотно сжатых направляющих, из-за дефектов изготовления деталей и выхода деформаций за пределы упругих деформаций в отдельных местах направляющих, возможно нарушение процесса качения и замена его «протаскиванием» сепаратора с шариками. Направляющая начинает работать с трением скольжения, что приводит к увеличению мёртвого хода. Поэтому оптимизация жёсткости направляющих позволяет

получить минимальное значение мёртвого хода.

Исследования жёсткости позволяют классифицировать НК. У консольной НК оптическая ось прибора смещена относительно механической поверхности, а у портальной (арочной) конструкции оптическая и механическая оси совмещены или оптическая ось расположена между опорными механическими поверхностями.

Классификация НК микроскопов, КИП и других лабораторных приборов по степени жёсткости приведена в табл 2.4.

Таблица 2.4

Тип НК	Характеристика несущей конструкции	Отношение жёсткости по осям		Степень жёсткости	Примеры применения
		Х	У		
Консольная	Подвижная стойка Неподвижный столик	1	1	III	Микроскопы, КИП
	Неподвижная стойка Фокусировочное перемещение с помощью предметного столика или перемещением ОС	2 – 5	3 – 8	II	Микроскопы, КИП, телескопы и другие
Портальная	Неподвижная стойка Фокусировочное перемещение ОС или объекта Оптическая ось совпадает с механической или расположена между опорными поверхностями стойки	10 – 20	5 – 15	I	Телескопы, фотоаппараты, интерферометры, микроскопы и другие ОП

2.8. Повышение стабильности и жёсткости конструкции

Повышение стабильности за счёт уменьшения упругих деформаций δ возможно реализовать, как это следует из формулы $\delta = P/C$, за счёт уменьшения усилий, действующих в приборах, и увеличения жёсткости. Увеличение жёсткости может обеспечиваться оптимизацией оптической и механической частей ОП. К общим способам, повышающим жёсткость конструкции, относятся:

- уменьшение размеров ОС и МС за счёт сокращения длины хода лучей, длины кинематических цепей, габаритных размеров НК и т.п;

- повышение уровня моноблочности при объединении деталей и сокращении числа соединений, особенно подвижных;
- отметим ещё раз необходимость уменьшения вылетов и увеличения баз (см. формулы 2.18, 2.24, 2.28).

Рассмотрим повышение жёсткости конструкции за счёт рационализации ОС.

Обычная схема голографического микроскопа показана на рис. 2.14а.

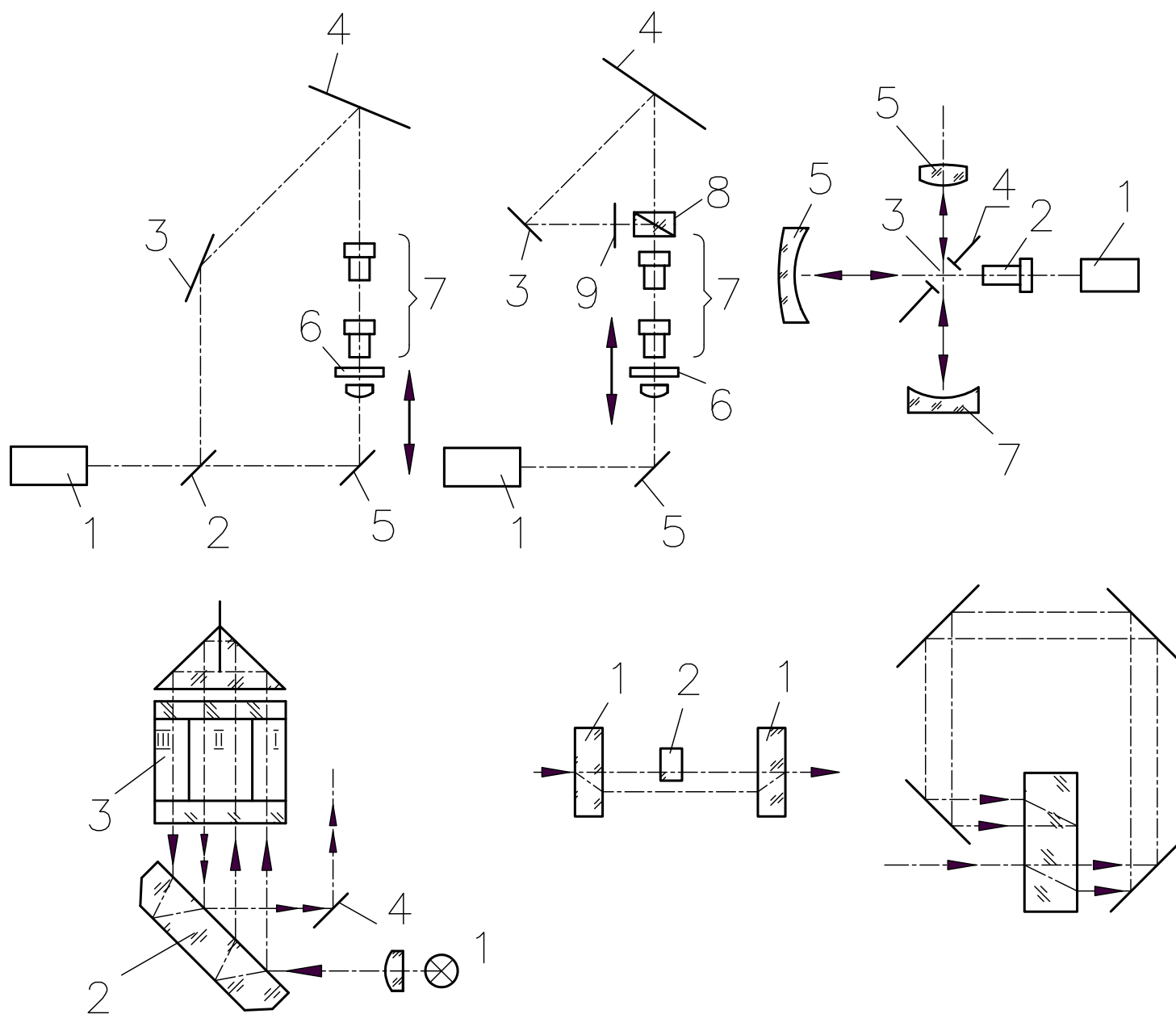


Рис. 2.14. Оптимизация стабильности оптических схем

Когерентный свет от лазера 1 разделяется светоделителем. Опорный пучок направляется зеркалом 3 на фотопластинку 4, а объектный пучок зеркалом 5 направляется на объект 6. Далее оптической системой микроскопа 7 пучок, содержащий информацию об объекте, направляется также на фотопластину 4, где фиксируется голограмма.

Вследствие разделения пучка лазера ещё в осветительной части длина хода лучей достаточно велика, поэтому небольшие смещения деталей приводят к большим смещениям в плоскости голограммы. Смещения в объектном канале дополнительно увеличиваются благодаря подвижным соединениям в фокусировочном механизме (фокусировочное движение отмечено стрелкой).

Микроскопы с такой схемой устанавливают на антивибрационном столе.

Схема, в которой для формирования опорного пучка используется часть объектного пучка, представлена на рис. 2.14 б. С этой целью светоделительный элемент 8 часть света направляет на диффузор 9, который стирает в пучке информацию об объекте и превращает его в опорный.

Интерферирующие пучки ограничены габаритами пространства, в которой расположены элементы 3, 4, 8. В схеме отсутствуют и движущиеся элементы. Жёсткость конструкции существенно увеличивается.

Схема интерферометра с дифрагированным эталонным фронтом изображена на рис. 2.14 в. Световой пучок от лазера 1 фокусируется объективом 2 на точечном отверстии 3, выполненном на зеркальном покрытии 4 плоского зеркала. Отверстие 3 становится источником дифрагированной сферической волны, которая направляется на контролируемую поверхность 5. Отражённая волна несёт информацию о поверхности 5 и после отражения от зеркала 4 направляется в выходное устройство 6. Часть излучения лазера 1 отражается от покрытия 4 и направляется на сферическое зеркало 7, отражается от него и фокусируется на отверстие 3. При этом на отверстии дифрагирует вторая волна, которая является эталонной сферой. В результате сложения этой опорной волны с волной, отражённой от поверхности 5, возникает интерференционное изображение, которое и характеризует качество поверхности 5.

Поскольку эталонная и рабочая волны возникают от одного отверстия, смещения зеркала 4 не влияют на взаимодействие волн. Недопустимы смещения зеркала 5 относительно отверстия 3.

Интерферометр, служащий для контроля воздуха в шахтах, приведен на рис. 2.14 г. Свет от лампы 1 направляется на толстую плоскопараллельную пластинку 2, задняя поверхность которой имеет зеркальное покрытие. Пластинка делит световой поток на два пучка. Первый пучок проходит через объёмы I и III газовой камеры

3, заполненные чистым воздухом. Второй пучок дважды проходит полость II, заполненную рудничным воздухом. Интерферирующие пучки вновь соединяются и зеркалом 4 направляются в систему наблюдения.

Поскольку разделение и соединение интерферирующих пучков выполняются с помощью одной моноблочной пластинки 2, обеспечивается стабильность интерференционной картины даже в приборе переносного типа, используемого в угольных предприятиях.

Схема интерференционно – поляризационного рефрактометра, содержащая две кристаллические пластинки 1, которые разделяют и соединяют световые пучки, показана на рис. 2.14 д. В одном из пучков устанавливается измеряемый объект 2. В схеме наблюдается значительный часовой дрейф показаний, составляющий $10^{-2} \lambda$, который возникает вследствие нарушения стабильности при повороте пластинок, и который не должен превышать 10^{-3} угл. сек. Температурные деформации также приводят к изменению взаимного положения пластинок.

Для повышения стабильности предложена схема (рис. 2.14 е), в которой разделение и соединение пучков осуществляется одной и той же пластинкой, в результате чего часовой дрейф составляет $10^{-5} \lambda$.

Из примеров видно, что оптимизация оптических схем существенно повышает стабильность функционирования и жёсткость конструкции ОП.

В отдельных случаях для компенсации смещений, изменения жесткости конструкция в процессе работы, например, при изменении центра тяжести, температурных смещениях, наличии вибрации и т.п. целесообразно использовать адаптивную оптику, позволяющую компенсировать деформации до 10...20 мкм при частоте до 10 кГц.

Рассмотрим рекомендации по повышению стабильности МС.

1. Количество соединений, особенно подвижных, узлов и деталей должно быть минимальным. Повышение жёсткости даёт переход от использования юстировочных механизмов, имеющих подвижные соединения, к жёсткому закреплению оптических деталей. В этом случае для юстировки используют съёмные технологические механизмы, которые после закрепления деталей удаляются из прибора.

2. Остаточные смещения при снятии нагрузки не исчезают и приводят к расцентровке оптической системы. Поэтому в конструкции необходимо либо предусматривать устройства для принудительного устранения зазоров, либо применять направляющие, имеющие, главным образом, упругие деформации (направляющие с трением качения или с молекулярным трением). Ориентировочно соотношение остаточных смещений в направляющих с трением скольжения, качения и молекулярным составляет 100:10:1.

3. Существенное увеличение жёсткости узлов с подвижными соединениями достигается в конструкциях, у которых опоры

расположены симметрично относительно оптической оси.

4. Для уменьшения смещений необходимо избегать вылетов балок, кронштейнов и других подобных конструкций, связывать узлы приборов таким образом, чтобы они образовывали замкнутую раму.

Проанализируем влияние размеров вылетов и опорных баз на положение деталей в пространстве.

На рис 2.15 а, б показано крепление линз на консольных оправах. Если опорная поверхность оправ линз выполнена с погрешностью Δy или вследствие деформаций механизма и по другим причинам получает аналогичное смещение, то возникает наклон оправы и смещение её вдоль оси XX на величину

$$\Delta x = \Delta \varphi y = \frac{\Delta y y}{L} .$$

Для случая, показанного на рис. 2.15 а, это смещение нарушает фокусирование линз, а в случае, приведённом на рис. 2.15 б, возникает децентрировка линзы.

В подвижном соединении (рис. 2.15 в) при перемещении направляющей вследствие зазоров или деформаций Δy происходит смещение точки А.

Величина таких смещений $\Delta x = \Delta y x y / L$.

При изменении направления движения смещения удваиваются. В том случае, если в точке А приложено усилие, необходимо, чтобы величина вылета $y < L/2\mu$, где μ – коэффициент трения.

У измерительных, установочных и других устройств, имеющих смещенное расположение измеряемого предмета и отсчётной шкалы, также возникают погрешности.

На рис. 2.15 г изображена конструкция штангенциркуля. Ошибка отсчёта Δx определяется погрешностями Δy направляющей грани и равна $\Delta x = \Delta y x y / L$.

Если мы будем уменьшать расстояние между измеряемым объектом и отсчётной шкалой, то будет уменьшаться и ошибка измерения Δx . Если $y = 0$, то и $\Delta x = 0$. На основе этого положения, высказанного Аббе в 1870 г., создаются конструкции многих измерительных приборов.

Рассмотрим компоновку НК продольных компараторов с параллельным (рис. 2.15д) и с последовательным (рис. 2.15е) расположением шкал 1, устанавливаемых на подвижных стойках 2. Отсчёт измерений проводится микроскопами 3. При параллельном расположении (см. рис. 2.15 д) погрешность сравнения двух шкал

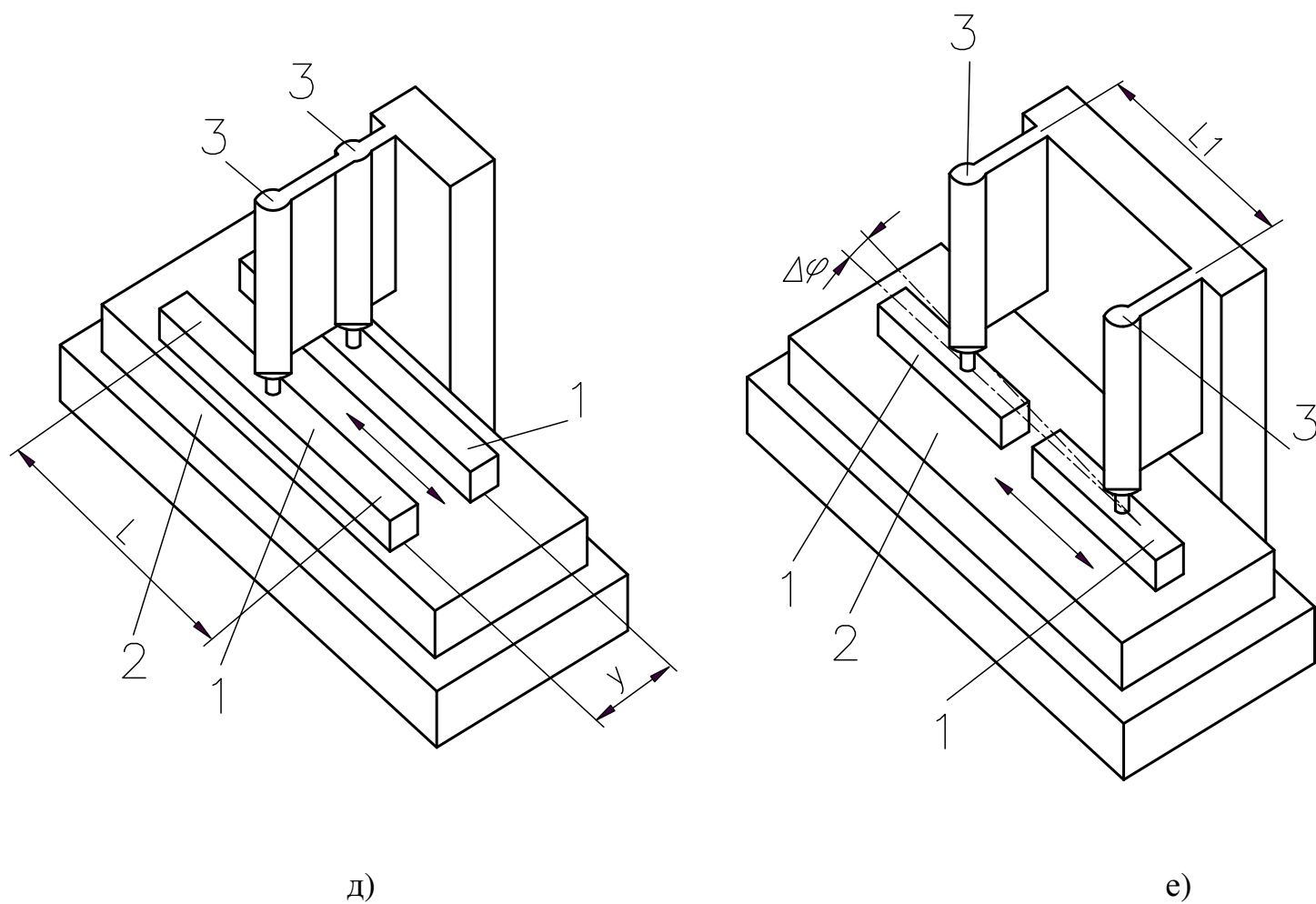
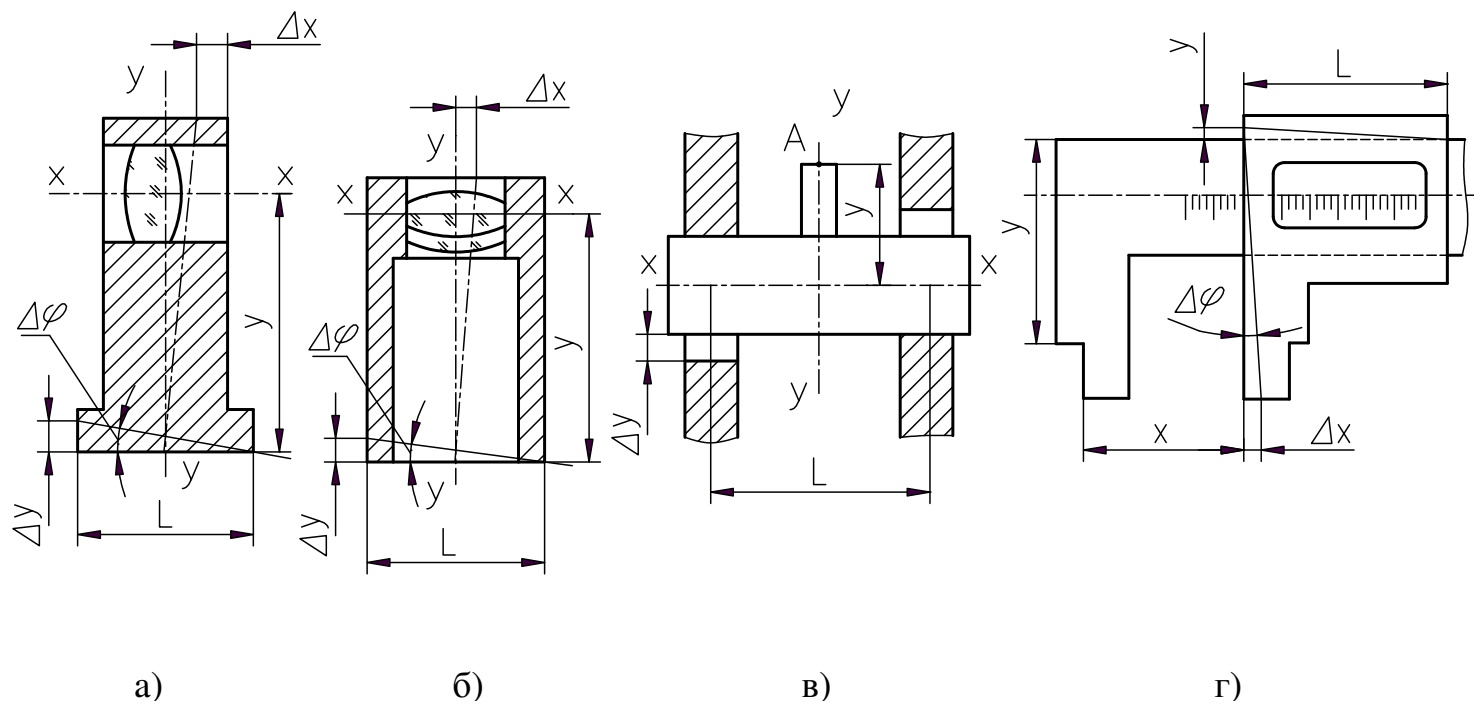


Рис. 2.15. Повышение точности ОП

$\Delta x = \Delta x_y / L$ и требования к точности изготовления направляющих стола 2 достаточны высоки. При последовательном расположении шкал (см. рис. 2.15е) и расстоянии между микроскопами L_1 возникает ошибка вследствие неточной установки шкал 1 относительно осей микроскопов (угол $\Delta\phi$). Ошибка измерения в этом случае определяется как разность между истинной длиной шкалы L и её проекцией на линию, соединяющую оси микроскопов. Она равна

$$\Delta x = L(1 - \cos\Delta\phi) \approx L\Delta\phi^2.$$

Если принять точность измерения 0,002 мм, $L = 500$ мм, то

$$\Delta\phi = \left(\frac{\Delta x}{L} \right)^{1/2} \cdot 206265 = 10'.$$

Обеспечить установку шкал с такой точностью конструктору не составляет труда.

5. Необходимо выбирать место приложения усилий в направлении наибольшей жёсткости или выполнять конструкцию таким образом, чтобы на движущиеся части передавались минимальные усилия.

6. Следует повышать качество поверхностей сопряжений и качество сборки. Для уменьшения контактных деформаций используют соединения с максимальной площадью контакта.

7. Необходимо увеличивать количество деталей, работающих на растяжение и сжатие, обладающих, как правило, значительно большей жёсткостью, чем работающие на изгиб и кручение. Следует также обращать внимание на оптимизацию поперечного сечения деталей.

8. Следует уменьшать влияние температурных деформаций. Тепло в ОП распространяется путём теплопроводности, конвекции (главным образом, естественной) и теплового излучения, проходящего и через оптические системы, нагревая их при этом.

Из анализов процессов теплообмена вытекают следующие рекомендации:

- для уменьшения теплопередачи за счёт теплопроводности следует применять теплоизоляционные прокладки и по возможности уменьшать сечение металлических деталей, осуществляющих связь между ними, т.е. создавать своеобразную «плотину», препятствующую переходу тепла;
- для уменьшения нагрева деталей, охлаждаемых благодаря конвекции и лучеиспусканию, следует увеличивать площадь деталей и применять оптимальные отделки.

Следует также создавать оптимальный по объёму и направлению

поток воздуха, что достигается при соотношении площади отверстий для воздушного потока к общей площади корпуса 1:200. Хороший отвод тепла создаётся тогда, когда отверстия в кожухе вынуждают течь поток воздуха через НК.

Хорошие результаты приносит установка экранов между источником тепла и кожухом.

Для параллельных стенок передача тепла при наличии экранов в $(n+1)$ раз меньше (здесь n – число экранов).

Для устранения нагревания оптических деталей на пути инфракрасных лучей устанавливаются теплозащитные стёкла или жидкостные кюветы, наполненные водой, глицерином или другими жидкостями. Следует применять и общепринятые способы, включающие:

а) установку приборов в помещениях со стабилизированной температурой;

б) уменьшение нагрева ОП от внутренних источников (вынесение за пределы прибора источников излучения, применение принудительного охлаждения светодиодов и т.п.);

в) подбор оптимальных материалов (с близкими коэффициентами линейного расширения или с весьма малыми коэффициентами линейного расширения - типа инвар);

г) использование схем температурной компенсации.

В качестве рациональных конструкций ещё раз отметим НК симметричной, порталной (арочной) формы, у которых оптическая и механическая оси совмещены. Особой жёсткостью отличаются НК, выполненные в виде моноблочных (или квазимоноблочных) трубчатых конструкций. Такая НК является типовой для электронных микроскопов. Современные электронные микроскопы, имеющие увеличение до $1000000\times$, предъявляют сверхвысокие требования к жёсткости конструкции (жёсткость до 1000000 Н/мм). Поэтому электронная пушка 1 (см. рис. 2.16 а), электронные линзы 2, 3 и 4 микроскопа и флюоресцирующий экран 5 монтируются в трубе 6, причём оптическая и механическая оси прибора совпадают. Благодаря такой НК электронный микроскоп обладает достаточной стабильностью. Аналогичную конструкцию имеют и трубки телескопов, в том числе и космических.

На рис. 2.16 б приведена арочная конструкция НК полуавтоматических микроскопов для измерений следов частиц в толстослойных фотоэмульсиях. Жёсткость по осям X и Y превышает 20000 Н/мм. На рис. 2.16 в приведена порталная НК двухлучевого и многолучевого интерферометра для измерения плоскостности точных деталей.

Таким образом, анализ стабильности и жёсткости НК показывает:

– для многих современных приборов стабильность НК является

основной характеристикой, которая во многом определяет надёжность и достоверность результатов исследований;

– жёсткость конструкции должна соответствовать выполняемой работе, при этом степень соответствия теоретической и действительной жёсткости является показателем целесообразности конструкции прибора.

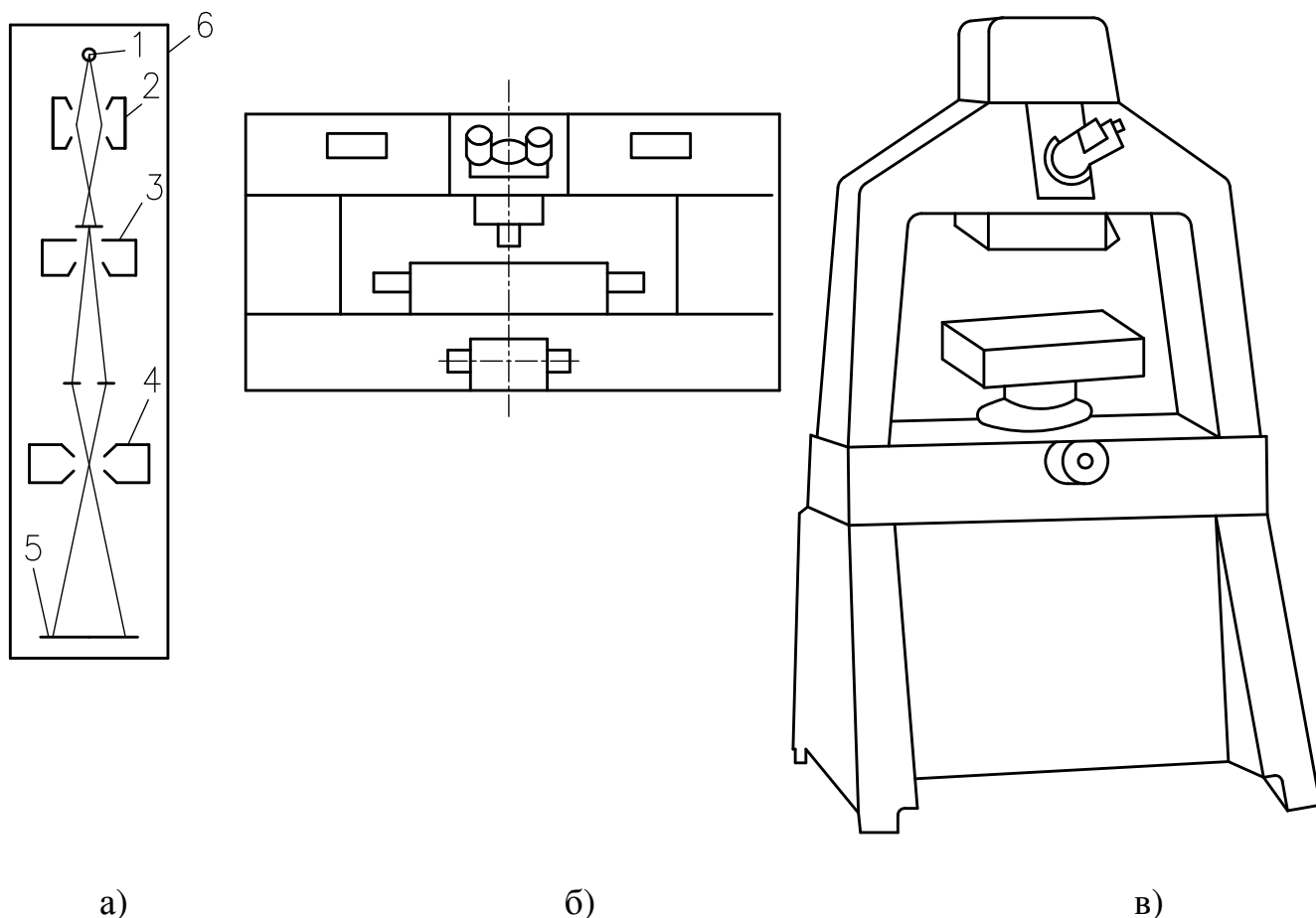


Рис. 2.16. Примеры рациональных конструкций

2.9. Колебания НК

С колебаниями ОП конструкторы сталкиваются при создании приборов, имеющих механические и автоматические приводы для перемещения разных узлов, для вращения модуляторов, зеркал, дифракционных решёток и т.д. Колебания приборов могут вызываться и колебаниями зданий, фундаментов и т.п. Наличие колебаний приводит к появлению чередующихся по знаку деформаций, т.е. к нарушению стабильности ОП. Если колебания совершаются без воздействия внешних сил или при постоянном действии внешних сил, то такие колебания называются свободными или собственными. В тех ОП, где всегда имеют место силы трения и присутствуют другие силы

сопротивления, свободные колебания быстро затухают. Вынужденные колебания продолжаются в течение всего времени действия силы. Движение X тела массой m под действием внешней силы Q , изменяющейся по гармоническому закону с частотой колебаний ω (1/с), выражается формулой

$$X = a_0 e^{-\alpha t} \sin(\omega_r t + \chi) + A \sin(\omega t - \psi), \quad (2.31)$$

где a_0, χ, ω_r – начальная амплитуда, фаза и частота затухающих свободных колебаний;

A, ω, ψ – амплитуда, частота и фаза вынужденных колебаний;

t – время.

В свою очередь

$$\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2},$$

где ω_0 – круговая частота собственных колебаний,

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (1/c) \quad \text{или} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{g}{\delta_{ст}}}.$$

Частота линейных колебаний

$$f = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta_{ст}}} = \frac{15,8}{\sqrt{\delta_{ст}}} \quad \text{Гц},$$

где m – масса, кг/с²/мм;

c – жёсткость, Н/мм;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$\delta_{ст}$ – деформация под действием массы, мм;

$\alpha = S/2m$, где S – сила сопротивления, Н/мм.

Амплитуда вынужденных колебаний $A = \gamma A_0$, $A_0 = Q/C$, $\gamma = S/\omega m$, где γ – коэффициент затухания сопротивления.

При малых декрементах затухания, что обычно характерно для ОП, $\omega_r \approx \omega_0$.

Расчёт колебаний НК представляет обычно определение частоты собственных колебаний ω_0 и сравнение её с частотой возмущающей силы ω . Явление резонанса не наблюдается, если $\omega_0 \neq \omega$ и отличается не менее чем на 20 – 30%. Лучше, если $\omega_0 > \omega$, т.к. в этом случае при использовании прибора нет прохождения через зону резонанса. Для упрощения расчётов будем считать НК линейной колебательной системой с малым затуханием, т.е. примем $\omega_0 \approx \omega_r$.

Расчётная схема приборов представляет систему со многими степенями свободы, достаточно сложную для расчётов. Например, НК микроскопа для проходящего света (рис. 2.17) имеет семь масс, каждая из которых может колебаться по осям X, Y и Z .

При анализе баланса упругих перемещений максимально упрощают схему. Для микроскопа наиболее важны смещения системы «объект – объектив». Наименьшую жёсткость имеет колебательная система, образованная массами m_5 и m_6 (система “фокусирующая – столик – объект”).

Для реальных значений жёсткости и массы узлов от 0,5 до 4 кг, характерных для ОП, частота собственных колебаний составляет 30...500 Гц - для подвижных узлов и 80...500 Гц – для неподвижных узлов. Отметим, что для многих ОП частота собственных колебаний основных НК находится в пределах 25...40 Гц.

Рассмотрим расчёт частоты собственных колебаний каретки сканирующих столиков, следящих устройств и других узлов, имеющих автоматизированные приводы.

В общем случае каретка направляющих имеет шесть степеней свободы (рис. 2.18 а), относительно осей X , Y , Z , т.е. упругие перемещения δ_x , δ_y , δ_z вдоль осей и углы поворота φ_x , φ_y , φ_z относительно этих же осей при упругих угловых деформациях (в радианах). Каретку можно представить как массу m , поддерживаемую пружинами, имеющими линейные C_x , C_y , C_z и угловые C_α , C_β , C_γ жёсткости. Они определяются соотношением

$$C_x = \frac{P_x}{\delta_x}, \quad C_y = \frac{P_y}{\delta_y}, \quad C_z = \frac{P_z}{\delta_z}, \quad C_\alpha = \frac{M_y}{\varphi_y}, \quad C_\beta = \frac{M_x}{\varphi_x}, \quad C_\gamma = \frac{M_z}{\varphi_z}, \quad (2.32)$$

где P_x , P_y , P_z – внешние силы,
 M_x , M_y , M_z – моменты, действующие по координатным осям,
 C_x – жёсткость привода каретки (передача “винт – гайка”, “рейка – шестерня” и т.д.).

Уравнения колебаний для одной плоскости (рис. 2.18 б, в) без учёта затухания записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + C_x(x - \alpha_1) &= P_x, \\ m\ddot{y} + C_y(y - \beta_2 + \gamma_3) &= P_y, \\ m\ddot{z} + C_z(z + \alpha_3) &= P_z, \\ I_x\ddot{\beta} + C_\beta\beta + C_y(y - \beta_2 + \gamma_3)a_2 &= M_x, \\ I_y\ddot{\alpha} + C_\alpha\alpha + C_z(z + \alpha_3)a_3 + C_x(x - \alpha_1)a_1 &= M_y, \\ I_z\ddot{\gamma} + C_\gamma\gamma + C_y(y - \beta_2 + \gamma_3)a_3 &= M_z, \end{aligned}$$

Где x , y , z – линейные перемещения,
 α , β , γ – угловые перемещения по координатным осям X, Y, Z , рад,

I_x , I_y , I_z – моменты инерции каретки,

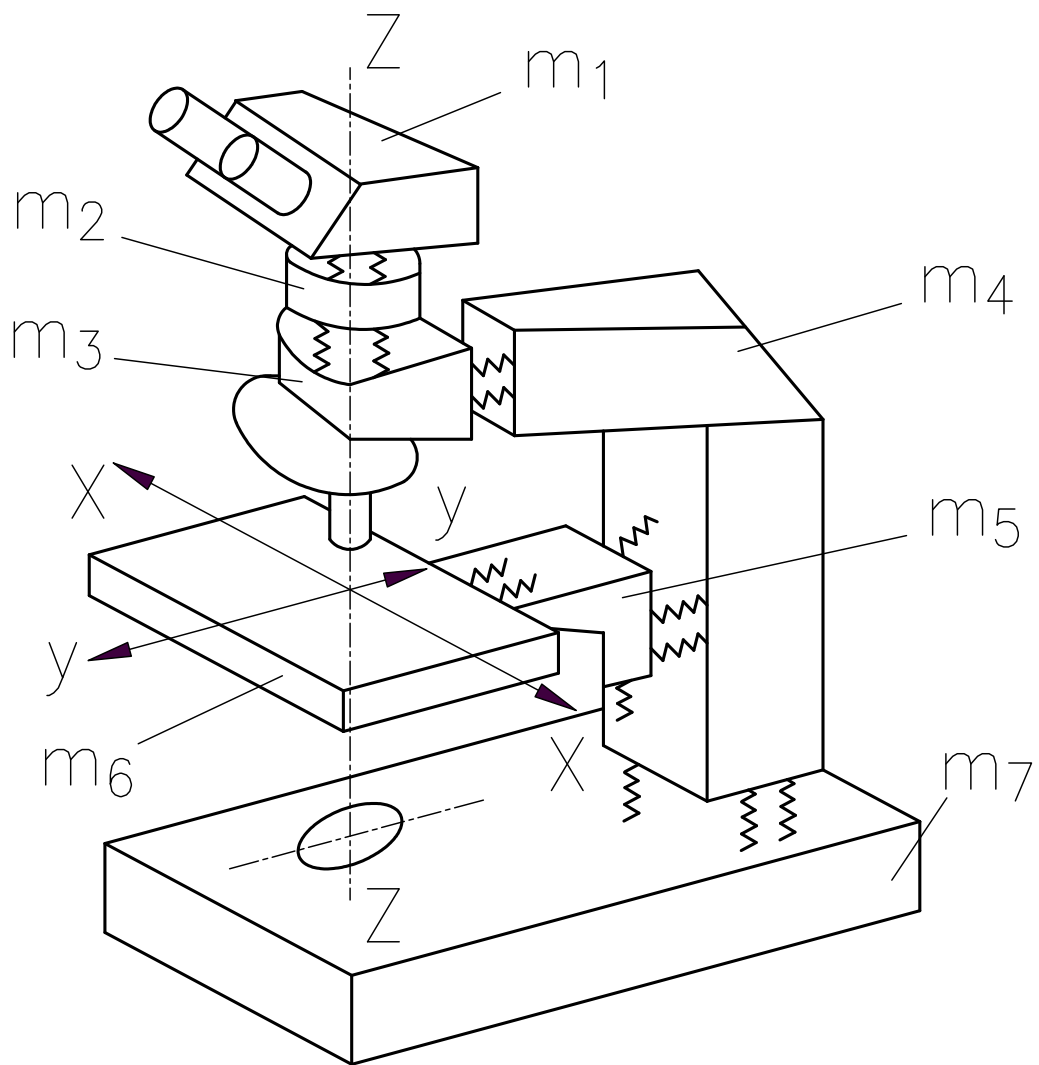


Рис. 2.17. Схема микроскопа

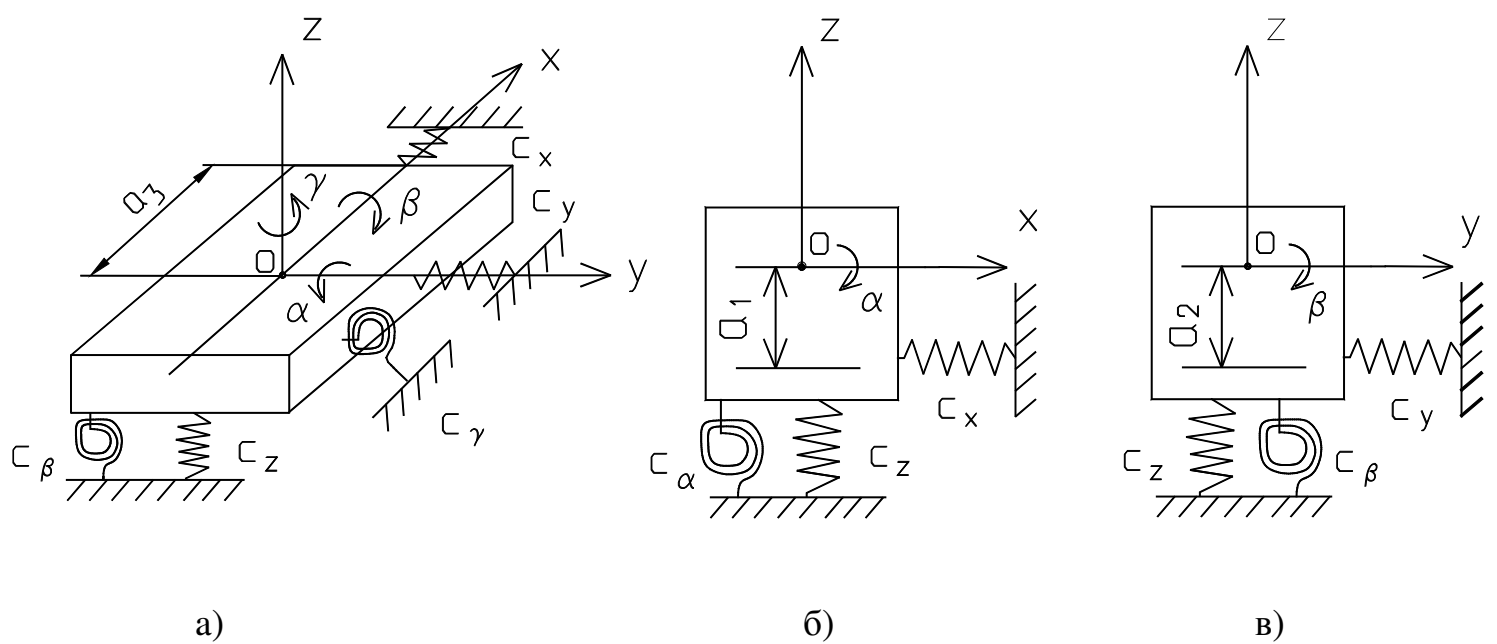


Рис. 2.18. Схема сканирующего столика.

a_1 – расстояние от центра тяжести каретки до привода (например, оси винта),

a_2 – расстояние от центра тяжести каретки до направляющих,

a_3 – расстояние от центра тяжести каретки до середины длины направляющих.

После решения системы уравнений получим формулу для частоты собственных колебаний в плоскости XOZ

$$\omega_{XOZ} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{c_\alpha}{I_y} + \frac{c_x}{m} + \frac{c_x a_1^2}{I_y} \right)} \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{c_\alpha}{I_y} + \frac{c_x}{m} + \frac{c_x a_1^2}{I_y} \right)^2 - \frac{c_x c_\alpha}{m I_y}}. \quad (2.33)$$

Аналогично находим частоту колебаний в плоскости YOZ

$$\omega_{YOZ} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{c_\beta}{I_x} + \frac{c_y}{m} + \frac{c_y a_2^2}{I_x} \right)} \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{c_\beta}{I_x} + \frac{c_y}{m} + \frac{c_y a_2^2}{I_x} \right)^2 - \frac{c_y c_\beta}{m I_x}}. \quad (2.34)$$

Частота колебаний вдоль оси Z

$$\omega_z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_z}{m}}. \quad (2.35)$$

Частота колебаний относительно оси Z

$$\omega_{zo} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_y}{I_z}}. \quad (2.36)$$

Для снижения колебаний производят уменьшение влияния возбуждающих колебаний за счёт применения демпфирования, виброизоляции ОП и гашения колебаний в месте их возникновения.

Демпфирование осуществляется с помощью механических или электрических демпферов, превращающих механическую и электрическую энергию в тепловую. Мерой демпфирования является коэффициент

$$D = \frac{\mu \omega_0}{2c} = \frac{\mu}{2cm}, \quad (2.37)$$

где μ – коэффициент трения,
 ω_0 – круговая частота собственных колебаний,
 c – жёсткость,
 m – масса прибора.

Изоляция от колебаний обеспечивает уменьшение колебаний или предотвращение их распространения с помощью упругих изолирующих элементов. При этом собственная частота ω_{oi} изолятора должна значительно отличаться от частоты ω_B возбуждающих колебаний.

В качестве изоляторов используют пружины, резиновые прокладки, многослойный материал, песок и т.п.

При гашении колебаний энергия возбуждения поглощается небольшой специально добавленной массой, благодаря чему колебания основной системы ОП гасятся (иногда до 75%). Гасители используют для гашения крутильных колебаний приводов, устанавливая на осях дополнительную вращающую массу, для гашения колебаний несущих конструкций, например, стоек операционных микроскопов, закрепляют на них через пружинно – амортизационные связи дополнительные массы.

2.10. Система “оператор – НК”

Большинство ОП эксплуатируются с участием человека и образуют целостную систему «человек – ОП», в которой зрительные, моторные, антропометрические и другие эргономические особенности оператора определяют многие требования к функциональной и управляющей подсистемам и НК (см. рис. 1.1).

Рационализация НК в отношении эргономики включает:

- обеспечение наилучшего использования функций человека, например, максимальной точности наводки, скорости реализации действия и т.д.,
- длительное сохранение работоспособности на высоком уровне,
- наиболее короткий период адаптации,
- наименьшие изменения результатов работы оператора,
- синхронность компонентов системы «человек – ОП», например, соответствие восприятия зрительного канала и действий рук оператора органам управления ОП.

На компоновку ОП и НК, особенно лабораторных, переносных, полевых, бортовых и других приборов, существенно влияют антропометрические и физиологические характеристики, определяющие:

- габариты рабочего места оператора, в том числе и положение выходных зрачков окуляров,
- расположение в пространстве и конструкцию органов управления и расположения средств отображения информации.

Физиология человеческого организма ограничивает силовые

нагрузки оператора, точность координации движений, характеристики зрительного канала.

В этом разделе рассмотрено влияние антропометрических характеристик на НК. Влияние других свойств человека изложено в последующих разделах.

Отметим, что в пособии выполнен анализ только тех требований эргономики, которые специфичны для ОП. Другие требования, общие для многих промышленных изделий, можно найти в специальной литературе.

Размеры тела человека, которые необходимо учитывать при конструировании ОП и при разработке рабочего места, приведены в табл. 2.5 и на рис. 2.19а.

Таблица 2.5

В сантиметрах

Обозначение размера на рис. 2.19а	Наименование размера	Мужчины		Женщины	
		M_i	σ_i	M_i	σ_i
1	Рост в положении стоя	172,0	5,8	160,7	5,7
2	Высота глаз в положении стоя	160,9	5,8	149,8	5,5
3	Высота глаз в положении сидя	120,0	4,3	112,0	4,2
4	Высота плеч в положении стоя	141,0	5,5	132,1	5,2
5	Высота до верхнего края согнутой ноги	57,0	3,6	52,3	3,5
6	Расстояние от туловища до края согнутой ноги	35,0	3,6	33,0	3,5
7	Расстояние от колена до конца ноги	21,0	2,6	18,0	2,0
8	Длина руки	75,3	3,3	67,6	3,1
9	Расстояние от локтя до конца кисти	46,5	2,0	42,7	1,8
10	Ширина плеч	42,0	2,0	38,0	1,8
11	Ширина бёдер	35,4	2,1	39,8	3,1
12	Расстояние между зрачками	6,4	0,3	6,2	0,6
Примечание – M_i – среднее арифметическое σ_i – среднеквадратическое отклонение					

Оператор работает на приборах сидя или в положении стоя. При работе с микроскопами, отдельными спектральными приборами, КИП, телескопами и т.д. глаз оператора сопряжён с выходным зрачком

окуляра. В тех случаях, когда оператор производит руками тонкие и длительные манипуляции, необходимо обеспечивать максимальную площадь прилегания рук к поверхности стола или вводить для рук специальные подлокотники.

Рациональные размеры рабочего места приведены на рис. 2.19б и в табл. 2.6.

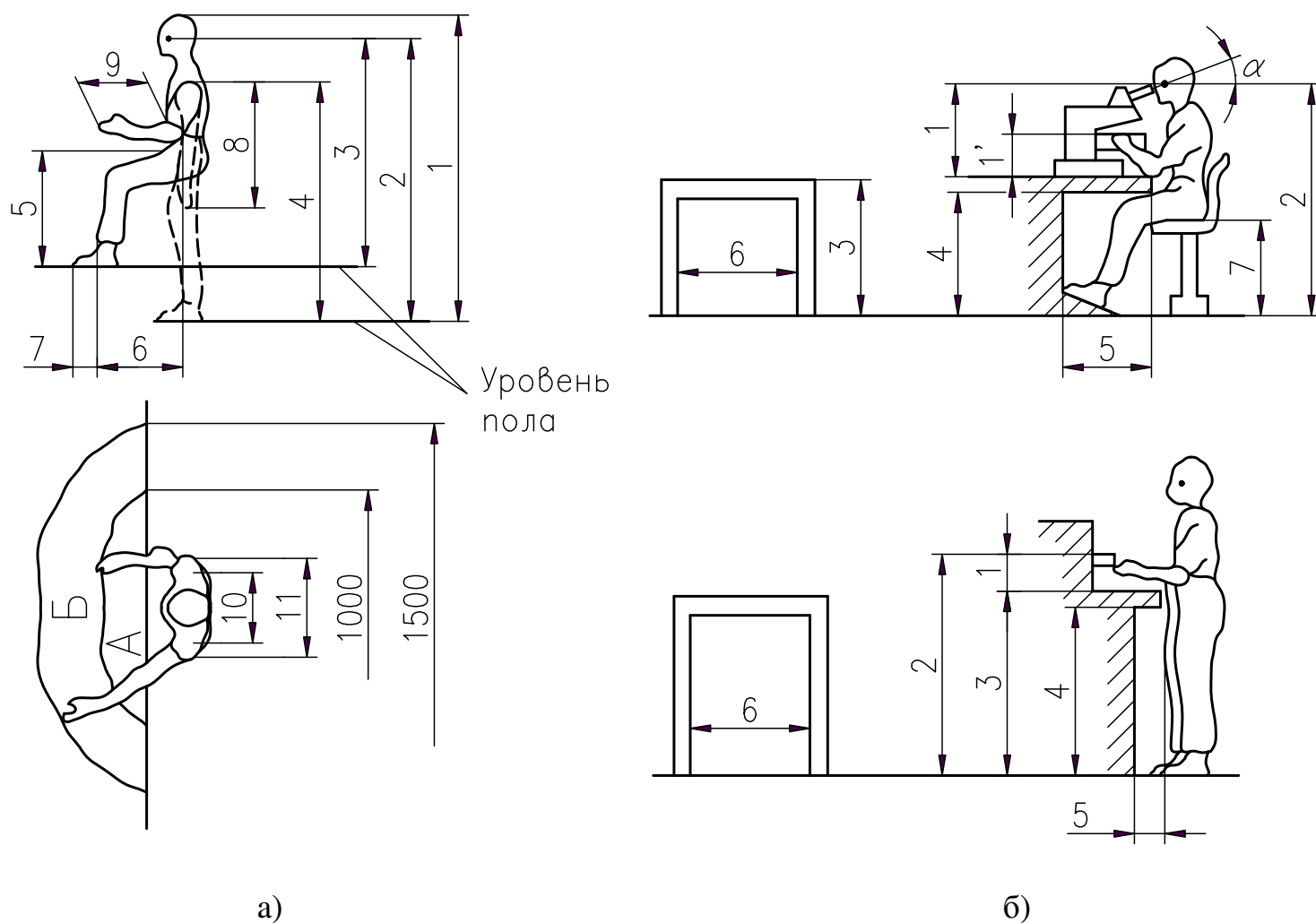


Рис. 2.19. Рабочее место

При проектировании ОП и рабочего места оператора необходимо также учитывать размеры зоны, удобной для работы руками (см. рис. 2.19а, внизу), обозначенной буквой А, и размеры максимальной зоны Б. Для настольных ОП при длительной работе на них (например, использование микроскопов при производстве микросхем и в других аналогичных случаях) важное значение имеет выбор наклона оптической оси выходного устройства в зависимости от высоты зрачка.

На рис. 2.20 штрихами выделена оптимальная зона, связывающая

высоту зрачка над плоскостью стола и угол наклона оптической оси α (см. рис. 2.19б, вверху).

Таблица 2.6

В сантиметрах

Обозначение размера на рис. 2.19б	Наименование размера	Назначение рабочего места	Размер при положении оператора	
			сидя	стоя
1	Высота рабочего места над столом	Для глаз (вых. зрачок окуляра)	36_{-6}^{+7*} (для горизонтальной оси) 28...44 (для наклонной оси)	По условиям работы
1'		Для рук	До 20	
2	Высота рабочего места от пола	Для глаз	116 ± 5 До 98	140 ± 55 117
3	Высота рабочей плоскости стола	Для рук	73...75	Не менее 90
4	Высота пространства для ног		Не менее 60	Не менее 10
5	Глубина пространства для ног		Не менее 60	Не менее 50
6	Ширина пространства для ног		Не менее 45	
7	Высота стула		40...45	
*Размеры по ГОСТ 3178 – 88				

Высота выходного
зрачка

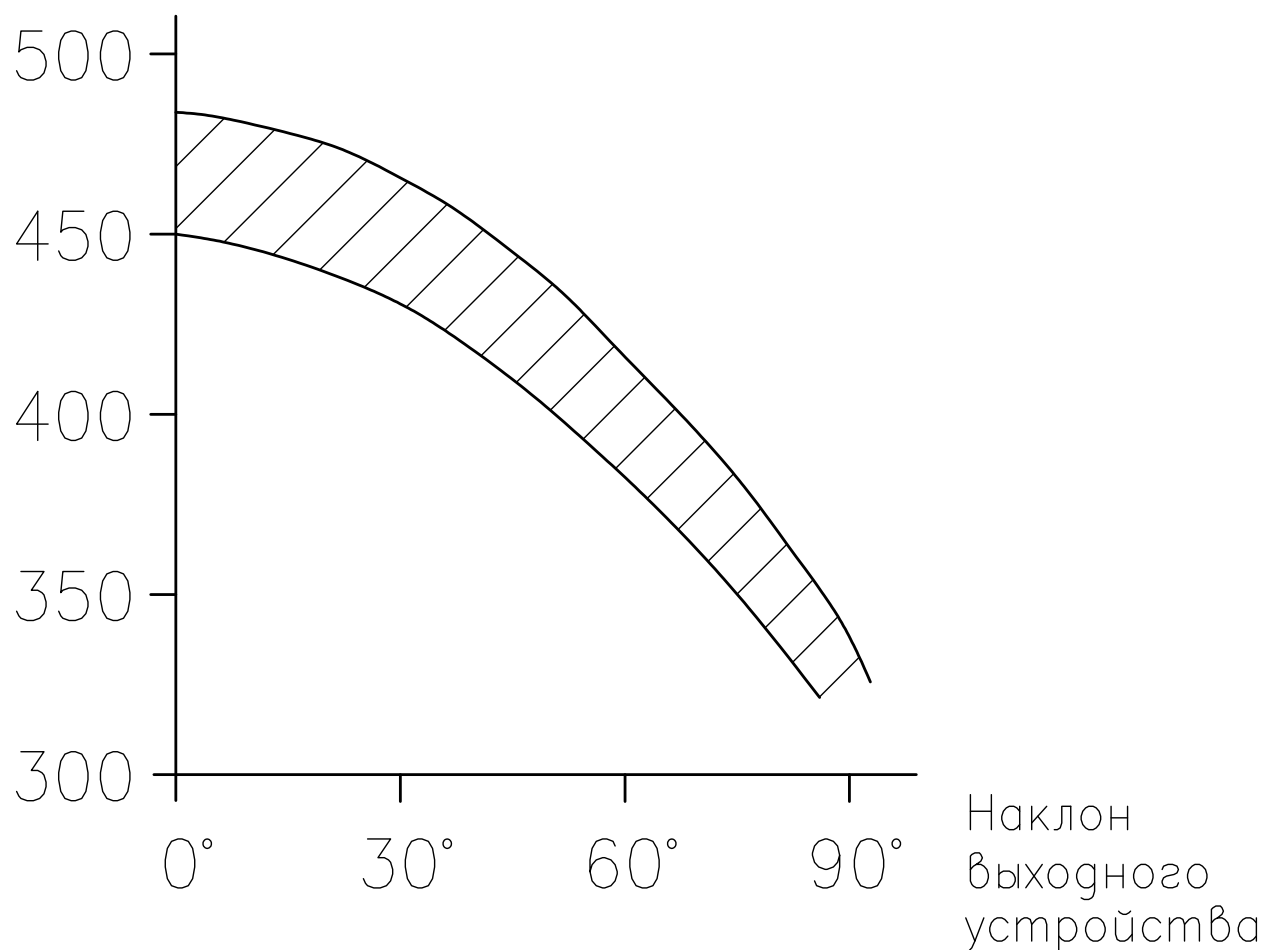


Рис. 2.20. Высота выходных зрачков

2.11. Унификация НК

Систематическое увеличение и обновление номенклатуры, постоянное усложнение приборов и другие особенности развития ОП приводят к мелкосерийному производству и, значит, к большим экономическим потерям.

Один из путей их сокращения состоит в использовании унификации, особенно группового проектирования. Наибольший эффект приносит унификация НК, поскольку в общем объеме затрат стоимость их изготовления составляет 30 — 60%. Вопросы унификации и группового проектирования изложены подробно в ч. I, гл. 9, 10.

2.12. Заключение

Таким образом, НК являются важнейшей частью приборов и во многом определяют функциональные, технологические и экономические показатели ОП. Оптимизация конструкции НК — одна из основных

задач разработчика.

Подчеркнём, что при создании НК следует стремиться к минимальным габаритам и весу, обеспечивать максимальное удобство работы оператору, гарантировать необходимую стабильность прибора, ориентируясь в большинстве случаев на агрегатно – модульную конструкцию ОП.

ГЛАВА 3. Анализ схем механизмов ОП

В ОП механизмы используются главным образом для осуществления целевой функции прибора (различные отсчетные и измерительные механизмы, приводы и редукторы, механизмы предметных столиков, лентопротяжные механизмы, затворы и т.д.) и как вспомогательные механизмы (откидные крышки, замки и пр.).

Применение механизмов в качестве НК изложено в главе 2.

Механизмы разделяются на плоские и пространственные. В пособии рассмотрены в основном плоские механизмы, точки звеньев которых описывают траектории, лежащие в одной или параллельных плоскостях. Из пространственных механизмов рассматриваются только неподвижные соединения, часто применяемые для установки или закрепления деталей. Отметим, что в действительности из-за технологических погрешностей формы и упругости деталей все реальные механизмы являются пространственными.

При системном подходе механизм можно рассматривать как замкнутую систему S , состоящую из СЧ, взаимодействие которых позволяет достичь заданной цели. Ее можно представить как

$$S = \{\varepsilon, \tau\}, \quad (3.1)$$

где ε – множество СЧ,
 τ – множество связей.

С точки зрения системного подхода механизмом называется замкнутая кинематическая система (цепь), состоящая из СЧ (пар, звеньев), которая обеспечивает выполнение функциональной цели (закона движения).

Кинематическая цепь, образующая механизм, состоит из системы кинематических пар, которые включают кинематические звенья. Кинематическая пара – это простейшее соединение двух звеньев, допускающее их движение. Звено – отдельная простейшая СЧ пары (ось, шестерня, рычаг и т.д.). Встречаются и звенья, входящие в несколько пар (например, рычаг).

Ранее отмечалось, что кинематику механизмов можно представить с помощью построения графов (см. ч I, гл. 2.4). Для более полного отражения в графах свойств кинематических схем введем обозначения следующих особенностей схем:

③ – отдельное движущееся звено 3,

Ⓢ – жесткое соединение звеньев 6 и 7,

$\underline{l}$ – поступательное движение звена,
 $\underline{\omega}$ – вращательное движение звена,
 $\omega \times l$ – винтовое движение звена.

Одной из главных задач конструктора является разработка и максимальное упрощение схемы при условии выполнения функциональной задачи.

Рассмотрим несколько примеров оценочного анализа кинематических схем.

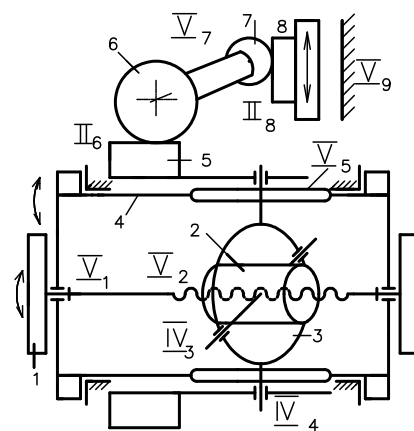
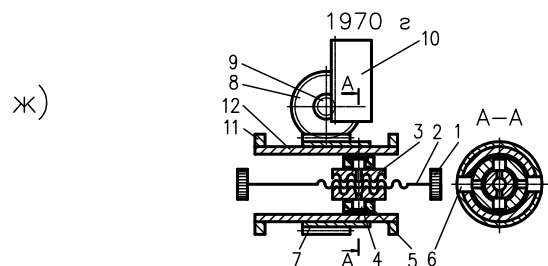
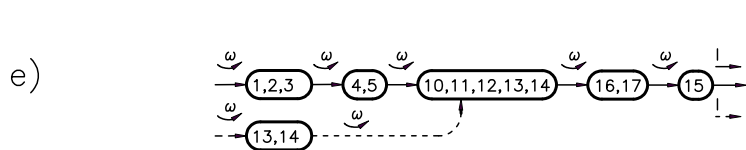
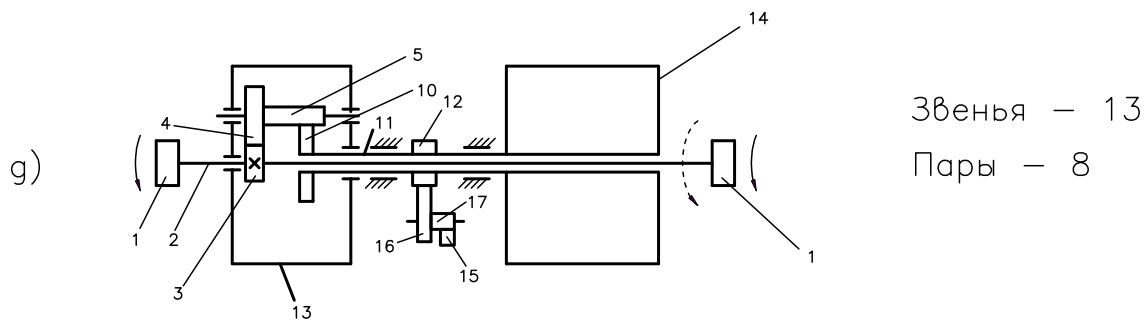
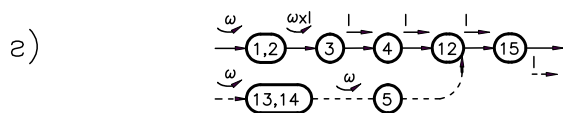
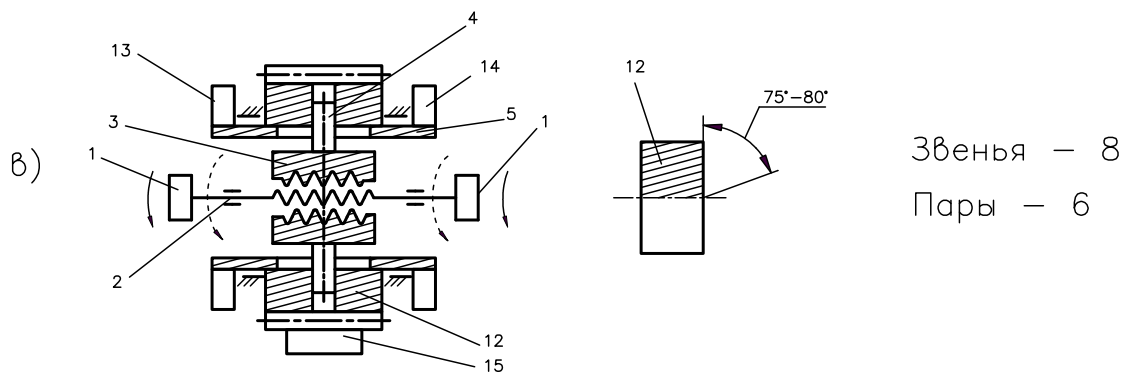
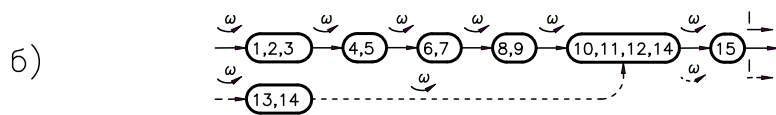
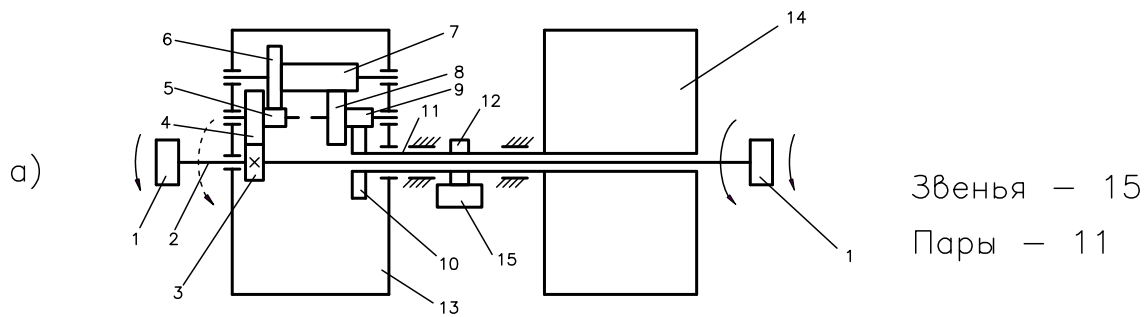
На рис. 3.1а показана кинематическая схема фокусирующего механизма, а на рис. 3.1б – ее граф. Из графа видно, что в кинематической цепи от входа (рукоятки 1) до выхода (трибки 12) использовано четыре зубчатых передачи. Они имеют общее передаточное отношение $\sim 1 : 200$.

Наиболее простым решением было бы объединение входа 1 и выхода 12. Однако, при такой схеме невозможно получить большое передаточное отношение, используя обычные цилиндрические зубчатые передачи. Но применяя кинематические звенья, имеющие большие передаточные отношения, например, резьбовые или клиновые, можно упростить схему. На рис. 3.1в представлена такая схема. Для получения дополнительного передаточного отношения на цилиндрической шестерне 12 косые зубья нарезаны под углом $10 \dots 15^\circ$. Косые зубья при перемещении шестерни 12 винтом 2 работают как клин. При вращении рукояток 13 и 14 осуществляется быстрое перемещение направляющей фокусирующего перемещения. Граф этого варианта показан на рис. 3.1г. Видно, что механизм существенно упростился. Однако, вследствие большого трения в резьбовой и клиновой парах, такая схема имеет большой мертвый ход, что затрудняет ее применение в точных механизмах. Но при использовании винтовых и зубчатых механизмов с трением качения такая схема может стать вполне работоспособной.

На рис. 3.1д дано одно из возможных решений, позволяющих упростить схему 3.1а. В схеме взамен четырех зубчатых пар используются две. Можно устранить и недостатки схемы 3.1в, введя взамен клиновой пары червячную и зубчатую пары (рис. 3.1ж). Такая схема с небольшими улучшениями используется в микроскопах единой системы (см. ч. I, рис. 2.8). Возможно использование и других вариантов, например, волновых передач.

Подобный анализ при разработке вариантов кинематических схем с целью их оптимизации должен обязательно проводиться на первых этапах их создания.

На начальной стадии следует также ориентировочно оценить сложность кинематики, которую можно характеризовать числом звеньев и числом связей кинематических пар. К сожалению, при таком подходе не учитываются сложность формы звеньев, точность их изготовления,



звеньев — 8
пар — 9

Рис. 3.1. Кинематические схемы и графы фокусирующих механизмов

используемые материалы, отделка и т.д.

Для получения количественных характеристик схем допустим, что сложность механизма растет пропорционально росту числа звеньев и числу связей пар, т.е. классу кинематической пары, что связано с усложнением взаимодействия большего числа звеньев и повышением точности изготовления пар, имеющих контакты по поверхностям и линиям.

Тогда сложность кинематики механизма можно характеризовать формулой

$$Q = \sum n + \sum P_i H_i, \quad (3.2)$$

где $\sum n$ – общее число звеньев,
 $\sum P_i H_i$ – сумма произведений числа пар P на класс каждой пары, который определяется числом связей.

Число степеней свободы пары:

$$S = 6 - H, \quad (3.3)$$

где H – класс пары.

Поскольку свободное твердое тело имеет шесть степеней свободы (три вращательных движения вокруг осей X , Y , Z и три поступательных вдоль этих осей), то кинематическая пара I класса имеет одну связь, пара II класса – две связи (цилиндр на плоскости) и т.д.

Исходной кинематической парой механизмов является точечная пара. С помощью параллельного соединения точечных пар могут быть получены пары разных классов. Так жесткое соединение двух точечных пар образует пару II класса, соединение трех точечных пар позволяет создать пару III класса и т.д. Соединяя пары II и I классов, получим пару III класса и т.д. Таким образом, при параллельном соединении точечных пар число связей суммируется.

В оптических приборах используют и упругие звенья: круглую проволоку, плоские пружины и плоские диафрагмы. Проволока позволяет получить поворот вокруг трех осей и два перпендикулярных перемещения, т.е. она эквивалентна паре I класса. Плоская пружина имеет два поворота и одно поступательное движение, т.е. она соответствует паре III класса. Плоская диафрагма обычно имеет одну степень свободы, но при замене плоскости другими поверхностями возможно появление и других подвижностей.

Схемы основных кинематических пар приведены в табл. 3.1.

Кинематические пары также делятся на низшие, в которых касание звеньев происходит по поверхности, и высшие, в которых звенья касаются в отдельных точках. Обычно изготовление низших пар стоит

Таблица 3.1

Конструктивные схемы пар и виды перемещений в них									
Класс пар	Число степеней свободы	I	5						
		II	4						
		III	3						
		IV	2						
		V	1						

дороже, чем изготовление высших пар. Однако в высших парах, вследствие малой поверхности контакта, могут возникать даже при сравнительно небольших нагрузках большие контактные напряжения, приводящие к необратимым деформациям. Особенно нежелательно такое явление в движущихся парах при трении скольжения, например, стали по стали.

Поэтому в таких случаях используют комбинацию из нескольких пар, обеспечивающих получение пяти степеней свободы, как и у точечной пары, но имеющих увеличенную площадь контакта. Такие комбинации показаны на рис. 3.2. Рис. 3.2а иллюстрирует схему, заменяющую точечную пару и состоящую из двух пар III класса. В этой схеме имеется одна лишняя степень свободы – вращение вокруг оси Z. На рис. 3.2б схема включает две пары V класса и одну пару III класса.

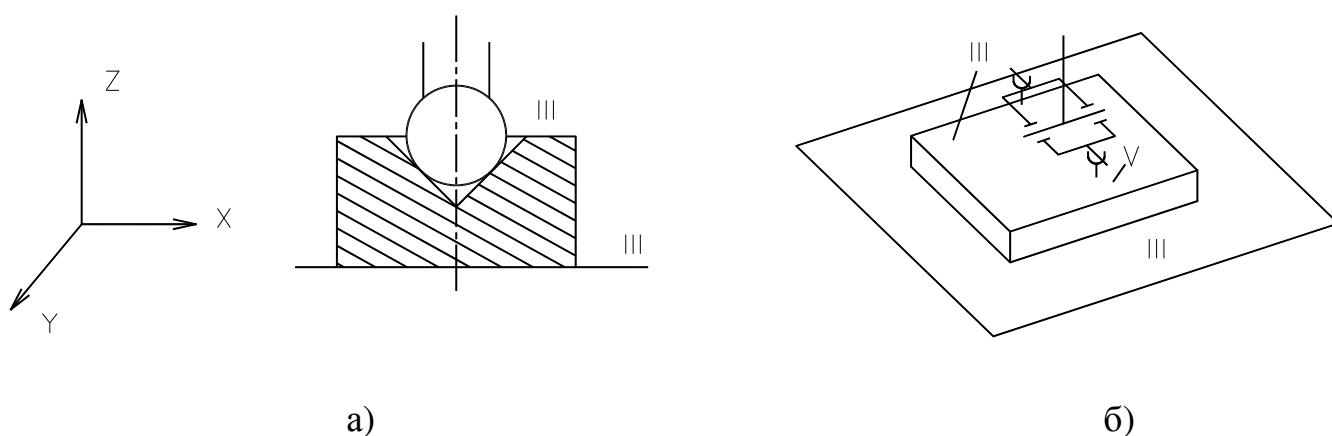


Рис. 3.2. Точечная пара, образованная из нескольких пар

Для обеспечения работоспособности механизмов (отсутствия заклинивания) используют два пути: исключение в механизме избыточных связей или изготовление деталей с высокой точностью, которая должна обеспечивать появление таких деформаций при заклинивании, которые не превышают упругих деформаций.

В механизмах встречаются иногда дополнительные степени свободы и связи, которые хотя и не влияют на закон движения механизмов, должны быть учтены при их разработке.

Дополнительные (местные) подвижности не влияют на точность механизма, а избыточные связи существенно ухудшают конструкцию. Устранение избыточных связей не увеличивает подвижности механизма. Они вызывают статическую неопределенность механизма, что приводит к появлению объемных деформаций при сборке, при изменении температуры, затрудняет ремонт и повышает трудоемкость сборки. Но в некоторых случаях, особенно при разработке несущих конструкций с большими нагрузками, целесообразно предусматривать дополнительные связи для обеспечения надёжности и прочности. Это позволяет гарантировать надежность конструкции при внезапном разрушении одной из связей.

3.1. Неподвижные соединения

Рассмотрим более подробно частный случай механизмов – неподвижные соединения. С подобными соединениями конструктор встречается при разработке узлов для неподвижной установки деталей (объемных и плоских), проектировании несущих конструкций и т.п.

Статически определимое неподвижное соединение накладывает шесть связей и требует в зависимости от класса от двух до шести кинематических пар. Связи при этом суммируются. Неподвижное соединение из шести пар состоит из пар I класса. Число степеней свободы с учётом формулы (3.3) равно в этом случае

$$S = 6 \times 1 - (6 \times 1) = 0.$$

Варианты выполнения таких соединений с помощью шести точечных пар показаны на рис. 3.3а – г. На каждой координатной плоскости могут располагаться от одного до трех выступов.

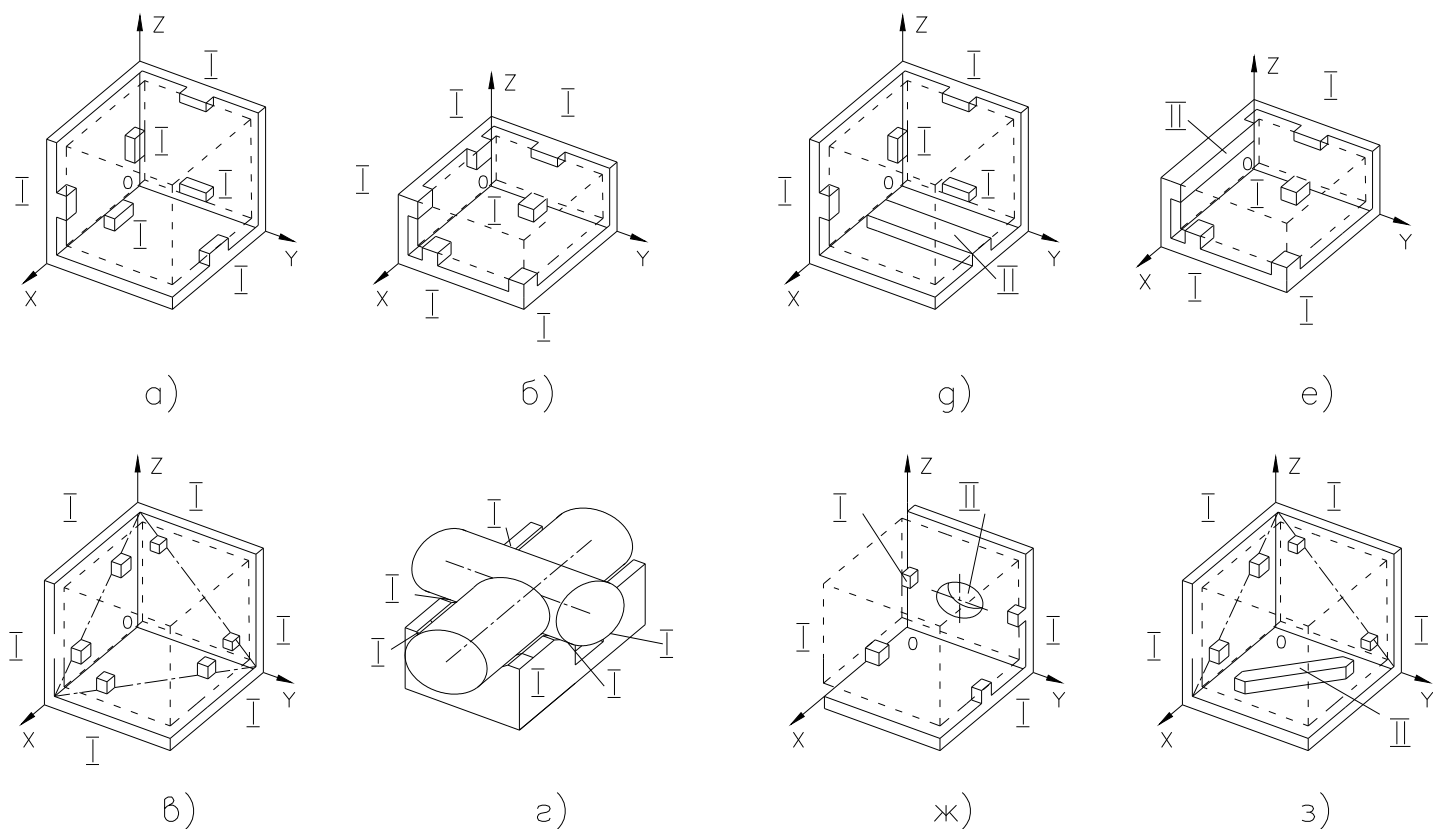


Рис. 3.3. Пары I, II классов

Соединения из пяти пар образуют, применяя одну пару II класса и четыре пары I класса, в этом случае

$$S = 6 \times 1 - (2 \times 1) - (4 \times 1) = 0.$$

В качестве пары II класса можно применить линейчатую (полосковую) пару или сферическую (кольцевую) пару, как показано на рис. 3.3 д, е, ж, з.

Соединения из трех кинематических пар получают с помощью следующих сочетаний:

$$S = 6 \times 1 - (3 + 2 + 1) \times 1 = 0 \quad \text{— по одной паре III, II, I классов (рис. 3.4а, б, в);}$$

$$S = 6 \times 1 - (3 \times 2) = 0 \quad \text{— три пары II класса (рис. 3.4г, д, е, ж, з);}$$

$$S = 6 \times 1 - (4 \times 1 + 2) = 0 \quad \text{— одна пара IV класса и две пары I класса.}$$

Неправильные схемы неподвижных соединений, выполненные из трех и шести пар и имеющие одну вредную подвижность и одну избыточную связь, даны на рис. 3.5. На рис. 3.5а контактные линии пересекают одну прямую, что приводит к появлению избыточной связи и вредной подвижности (вращению) вокруг этой оси. Параллельность контактных линий (рис. 3.5б) также создает вредную подвижность (вращение вокруг линии параллельной оси ОХ) и ограничивает поворот вокруг оси ОZ (двумя линейчатыми парами), т.е. имеет одну избыточную связь. Схемы, составленные из пар I класса (рис. 3.5 в,г) имеют те же недостатки.

Соединения из двух кинематических пар можно получить и с помощью сочетаний:

$$S = 6 \times 1 - (5 + 1) \times 1 = 0 \quad \text{— пары V и I классов,}$$

$$S = 6 \times 1 - (4 + 2) \times 1 = 0 \quad \text{— пары IV и II классов.}$$

При выборе варианта неподвижного соединения конструктор должен учитывать усилия, действующие в соединении, габариты, возможные пригонки при юстировке, трение в парах, технологичность деталей и другие условия использования соединений. Например, соединение, показанное на рис. 3.4в, более приемлемо в тех случаях, когда нагрузка действует в направлении плоскостной пары, а соединение показанное на рис. 3.3б имеет высоту меньше, чем соединение на рис. 3.3а. Соединения, имеющие пары I класса, особенно удобны при юстировке, тем более, что в реальных конструкциях точечную пару часто выполняют в виде винтов.

При использовании неподвижных соединений следует учитывать

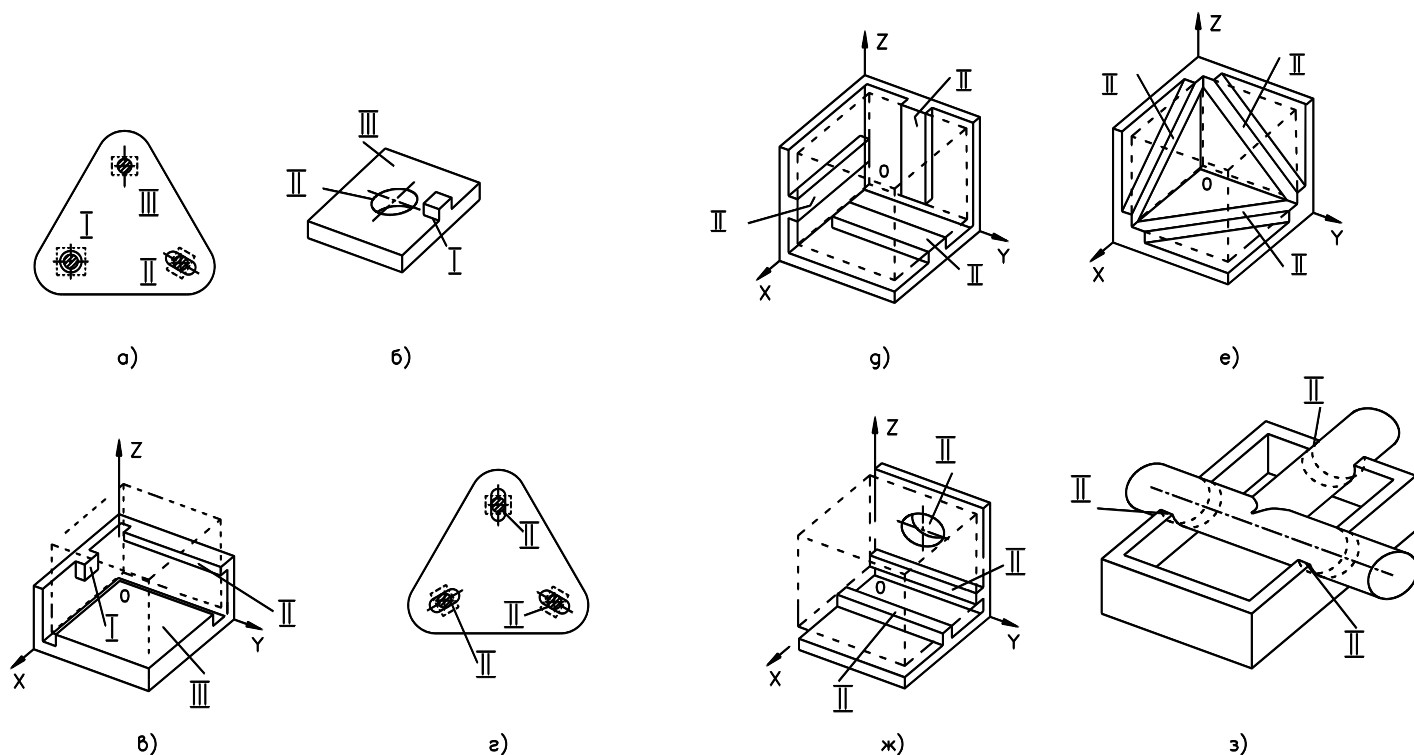


Рис. 3.4. Правильные пары I, II и III классов

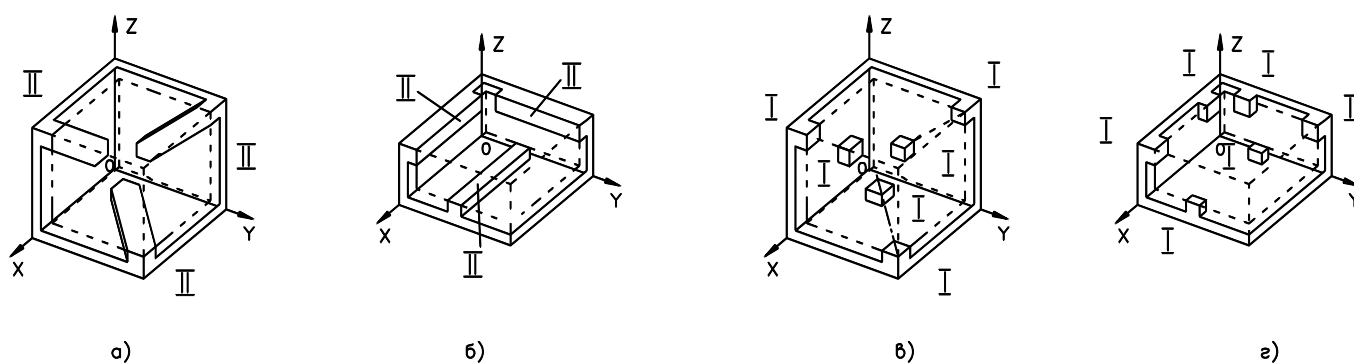


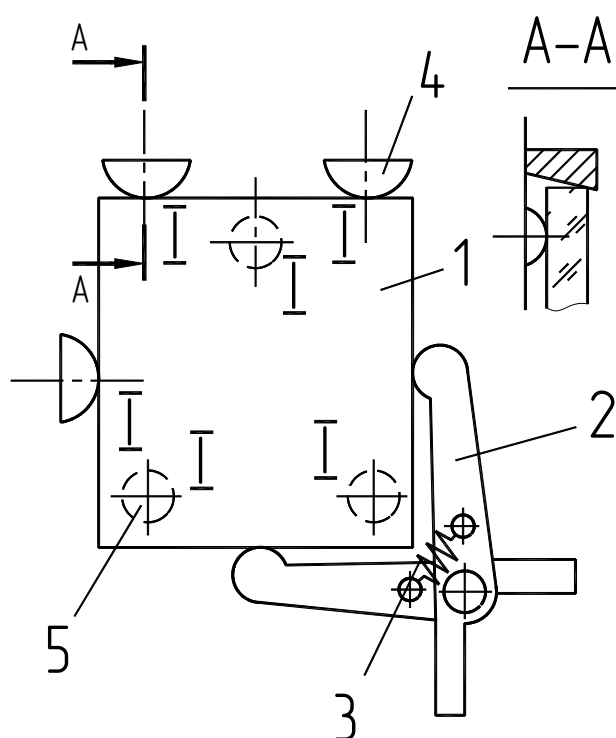
Рис. 3.5. Неправильные схемы

силы трения и контактные напряжения, которые в точечных парах могут быть достаточно велики. Трение и контактные деформации могут существенно влиять на самоустанавливаемость звеньев, что иногда является решающим. В таких случаях используются точечные пары, показанные на рис. 3.2. В конструкции следует предусматривать силовое или принудительное замыкание, а при необходимости использовать трение качения.

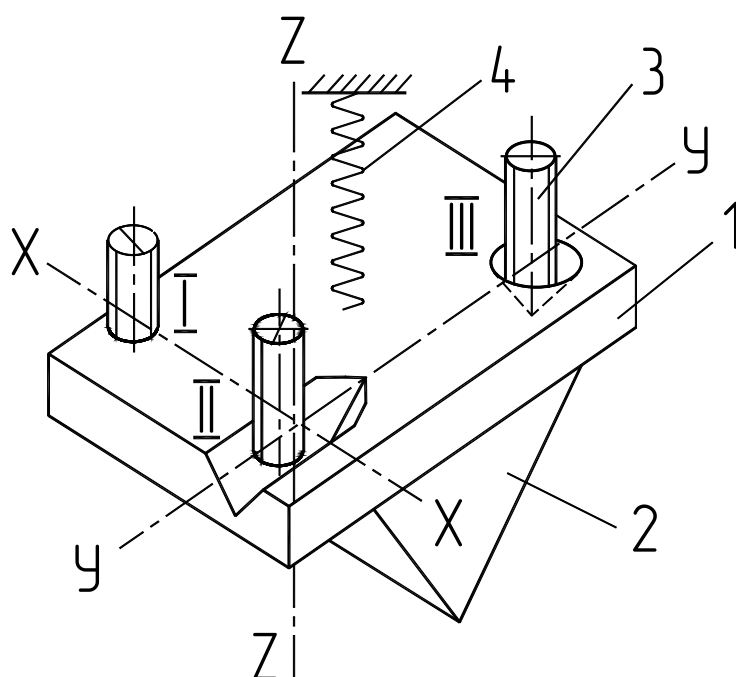
Рассмотрим примеры статически определенных конструкций неподвижных соединений. Конструкция держателя микросхем дана на

рис. 3.6а. Подложка 1, на которой расположен объект, прижимается вращающимися лапками 2 с помощью пружины 3 к трем упорам 4, образующим пары I класса. Подложка 1 под действием собственного веса располагается на трех запрессованных шариках 5, образующих три точечных пары. Число степеней свободы в такой конструкции $S = 6 \times 1 - (6 \times 1) = 0$.

Благодаря статически определенной конструкции обеспечивается стабильность установки объекта до 1 – 2 мкм.



а)



б)

Рис. 3.6. Статистически определенные конструкции

На рис. 3.6б изображен юстировочный механизм для установки оптических деталей. Фиксация и качение оправы 1 с призмой 2 производится вокруг осей XX и YY с помощью трех стопорных винтов 3, имеющих сферические концы. Один стопор входит в конус и образует пару III класса, второй имеет контакт с наклонными стенками паза и образует пару II класса, третий стопор создает пару I класса. Силовое замыкание обеспечивается пружиной 4. Механизм не имеет избыточных подвижностей и связей и обеспечивает фиксацию деталей

$$S = 6 \times 1 - (3 + 2 + 1) \times 1 = 0.$$

Кроме того, при раздельном вращении крайних винтов возможно независимое качание вокруг осей XX и УУ. Вращение всех винтов обеспечивает перемещение по оси ZZ

Экспериментальные исследования показали, что погрешность установки в статически определенных конструкциях не превышает 2...3 мкм. и в значительной степени определяется усилиями зажимных устройств, вызывающих упругие деформации деталей.

Например, в зажимных механизмах, в которых базирование деталей происходит по схемам, показанным на рис. 3.7, во время закрепления детали зажимными устройствами происходят упругие и остаточные перемещения. Возникает погрешность установки, содержащая линейные и угловые смещения. Исследования показали, что для различных схем приложения зажимных усилий величина смещений зависит от порядка приложения зажимных усилий. Только при параллельных зажимных усилиях ($P_1=P_2=P_3$) по схеме рис. 3.7а, погрешность не зависит от последовательности приложения сил. Для остальных случаев (рис. 3.7б, в, г) погрешность закрепления зависит от порядка приложения сил. При этом минимальная линейная погрешность возникает в направлении действия той силы, которая прикладывается первой (например, на схеме рис. 3.7в ошибка минимальна по оси У, если первой прикладывается сила P_3). Угловые смещения зависят от места приложения усилий.

Таким образом, при разработке зажимных устройств конструктор должен учитывать величину, место приложения и последовательность приложения нагрузок.

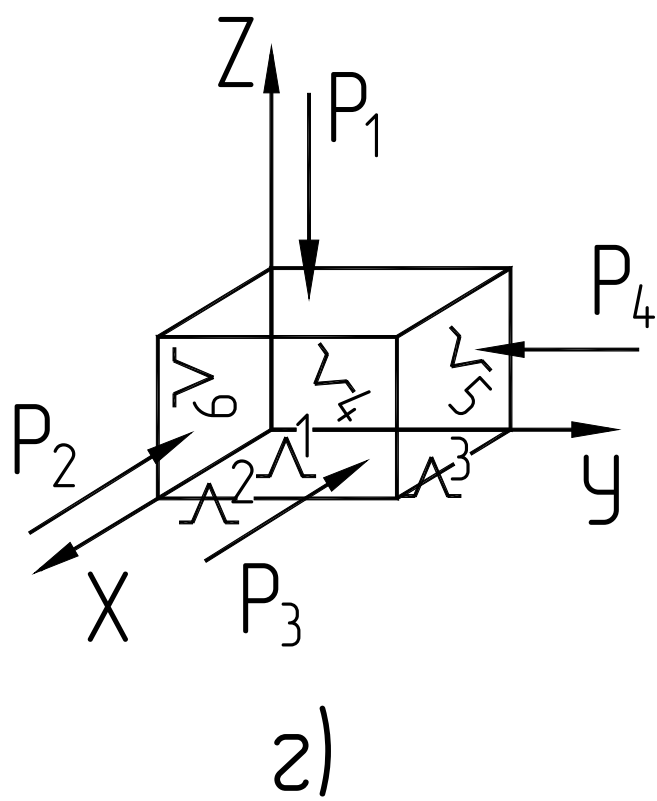
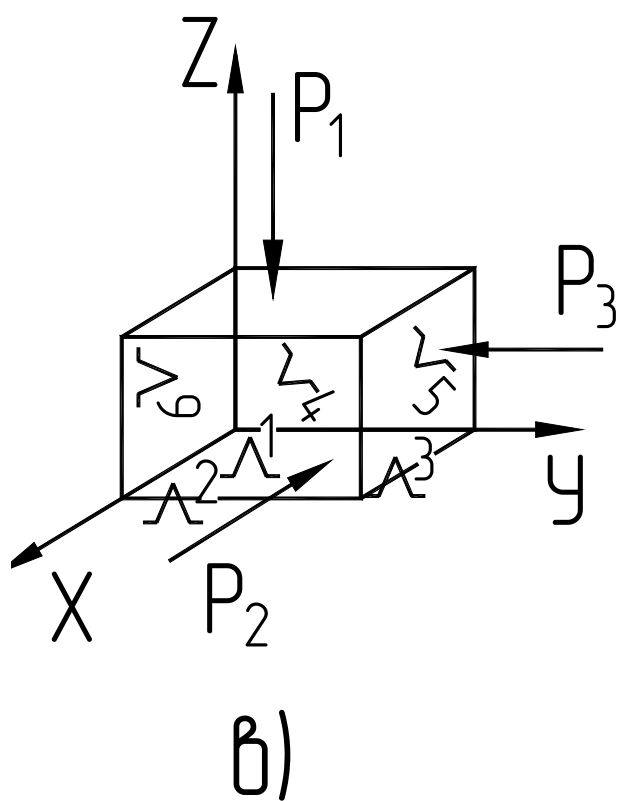
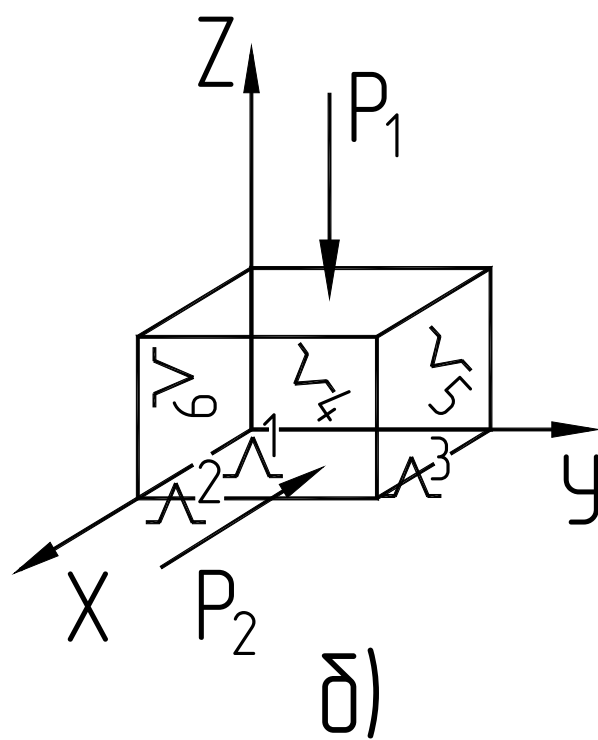
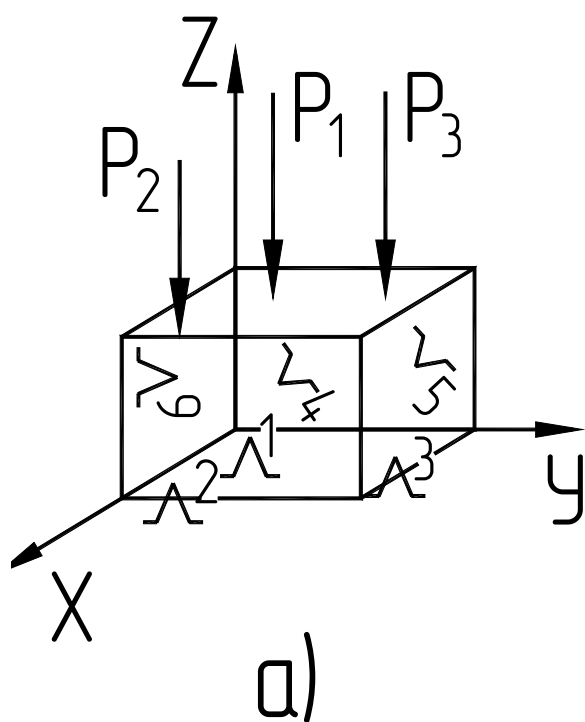


Рис. 3.7. Схемы приложения усилий

3.2. Механизмы для передачи движения

В общем случае звенья замкнутой кинематической цепи могут образовать несколько независимых замкнутых контуров. Число таких контуров K у механизмов, имеющих стойку, равно

$$K = p - п, \quad (3.4)$$

где p – число кинематических пар,
 $п$ – число звеньев цепи без учета ее стойки.

Очевидно, что $K \geq 1$. Если часть звеньев механизма имеет больше чем одну кинематическую пару (например, шестерня, сцепленная одновременно с двумя другими шестернями и вращающаяся на оси), то образуется многоконтурный механизм, поскольку такие звенья используются в нескольких контурах.

Для того, чтобы механизм был статически определенным, т.е. собирался без деформаций, каждый независимый контур должен иметь три линейные и три угловые подвижности вокруг трех координатных осей. Следовательно, у механизма, в который входят K контуров, общее число подвижностей F равно

$$F = 6K. \quad (3.5)$$

При сборке механизма его звенья могут быть состыкованы не только за счет поступательных перемещений, но и за счет поворотов. Поступательное перемещение звена можно заменить угловой подвижностью вокруг оси, перпендикулярной к линейной подвижности и находящейся за пределами линии подвижности.

Для определения общего числа подвижностей F в механизме нужно подвижности каждой пары разложить по осям координат и общее число подвижностей $\sum S_i$ всех кинематических пар механизма представить как арифметическую сумму линейных подвижностей f_x, f_y, f_z и сумму угловых подвижностей $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ вокруг осей X, Y, Z то есть

$$F = \Sigma(f_x + f_y + f_z) + \Sigma(\varphi_x + \varphi_y + \varphi_z). \quad (3.6)$$

Если в механизме используется W рабочих подвижностей, то для нормальной работы механизма, имеющего p кинематических пар, которые обеспечивают число степеней свободы $\sum_{i=1}^{i=p} S_i$ необходимо соблюдать соотношение

$$F = \sum_{i=1}^{i=p} S_i - W. \quad (3.7)$$

Для одной кинематической пары число степеней свободы равно

$$S_i = 6 - H_j, \quad (3.8)$$

где H_j – число связей j -й кинематической пары, которое соответствует классу пары.

Из формулы (3.8) также следует, что число связей

$$H_j = 6 - S_i \quad (3.9)$$

Если в механизме число подвижностей $F > 6K$, то имеем соответственно лишнее число подвижностей f или ϕ , если $F < 6K$, то имеем избыточные связи g . Таким образом,

$$f = F - 6K, \quad g = 6K - F. \quad (3.10)$$

В формуле (3.7) член $\sum S_i$ может в отдельных случаях включать кинематические пары, имеющие подвижности и связи, которые при суммировании взаимно уничтожаются, тем не менее формулой (3.7) можно пользоваться в большинстве случаев.

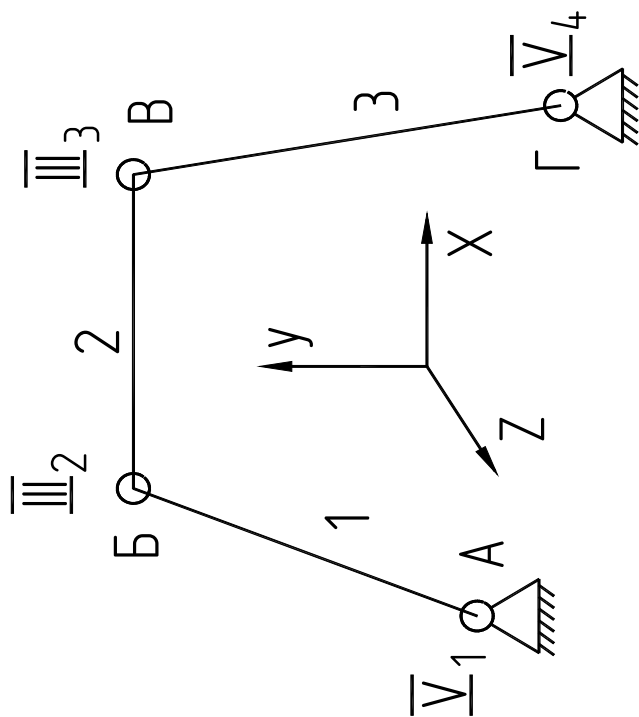
Для структурного анализа механизмов также пользуются аналитическими таблицами, в которых указаны кинематические пары и их подвижности (см. табл. 3.1).

Рассмотрим пример такого анализа. На рис. 3.8 показана схема четырех-шарнирного механизма, имеющего шаровые пары III класса в точках Б и В и вращательные пары V класса в точках А и Г. На рисунке и в таблице к нему обозначено: f – число местных подвижностей, g – число

избыточных связей, w – число рабочих подвижностей, $\sum S_i$ – общее число подвижностей.

Римские цифры обозначают классы кинематических пар, а индексы при них – порядковые номера пары. Вначале определим число контуров механизма при $p = 4$ и $n = 3$, т.е. $K = 4 - 3 = 1$.

Поэтому механизм для нормального функционирования должен иметь не менее шести степеней свободы. Затем в таблице указывают подвижности $f_x, f_y, f_z, \phi_x, \phi_y, \phi_z$ пары в соответствии с таблицей. Наличие подвижности отмечается цифрой 1, отсутствие – 0. Далее в каждой строке суммируют число единиц (подвижностей). У данного механизма, в котором используются кинематические пары III и V классов, линейные подвижности отсутствуют, а сумма угловых равна 8 – превышает



$$K=4-3=1$$

Подвижность	№ кинематической пары				ΣS_i	Схема композиции	f	q	w
	1	2	3	4					
f_x	0	0	0	0	0				
f_y	0	0	0	0	0				
f_z	0	0	0	0	0			0	1
φ_x	0	1	1	0	2		$1f_{x2}$		φ_{z1}
φ_y	0	1	1	0	2				
φ_z	1	1	1	1	4				
S_j	1	3	3	1	8				
Σ									

Рис. 3.8. Четырехшарнирный механизм

необходимое число подвижностей одноконтурного механизма.

Так как механизм имеет только угловые подвижности, необходимо рассмотреть возможность их использования для компенсации линейных подвижностей вдоль перпендикулярных этим подвижностям осей, т.е. для компенсации подвижностей f_x и f_y (схема компенсации указана стрелками в колонке). Угловая подвижность φ_Z используется для рабочего движения звена 1 вокруг оси Z (указано стрелкой к колонке w). Угловая подвижность φ_Y используется для компенсации подвижности f_Z . Остается неиспользованной одна угловая подвижность f_X , которая приводит к появлению местной угловой подвижности (указано стрелкой к колонке f), т. е. звено 2 имеет вращение (φ_{X2}) вокруг своей продольной оси. Работе механизма эта местная подвижность не мешает. Из анализа следует, что механизм не имеет избыточных связей и собирается без объемных деформаций.

Выполним анализ механизма используя формулу (3.7). Проверим механизм на излишние связи и местные подвижности. Для этого механизма общая подвижность контура F составит $F = (S_1 + S_2 + S_3 + S_4) - w$, где $S_1...S_4$ – соответственно подвижности 1...4 пары.

Подставляя численные значения S для каждой пары и считая, что число рабочих подвижностей $w = 1$, получим $F = 6.1 = 1 + 3 + 3 + 1 - 1 = 7$.

Таким образом, механизм имеет одну лишнюю подвижность, как это было выявлено ранее.

Выполним анализ направляющих, схема которых показана на рис.3.9. Здесь же обозначены классы кинематических пар и приведена структурная таблица. Число контуров в механизме $K = 2 - 1 = 1$, т.е. механизм должен иметь шесть степеней свободы.

Из таблицы следует, что всего имеется шесть степеней свободы. Поскольку одна линейная подвижность f_Z используется для рабочего движения w звена 1 (f_{Z1}), а одна угловая подвижность φ_Z применяется для компенсации линейной подвижности f_Y , то появляется одна избыточная связь g , ограничивающая угловую подвижность звена 1 вокруг оси X (g_{X1}). Следовательно, при конструировании механизма следует регламентировать высокие требования к взаимному развороту подвижных опор А и Б и неподвижных плоскостей основания, по которым скользят эти опоры. Для устранения этой связи можно звено 1 заменить вращательной парой V класса, как указано пунктиром на рис. 3.9. Можно также цилиндрическую опору Б заменить точечной парой I класса. Возможны и другие решения, например, установка опор А или Б на вращательных парах V класса и т.д. В реальном механизме опоры А и Б изготовлены из фторопласта и при относительной мягкости материала происходит их притирка к основанию.

Проверим механизм по формуле (3.7), число контуров $K = 2 - 1 = 1$, $S_1 = 2$, $S_2 = 4$, $w = 1$; тогда общая подвижность $F = 5 \times 1 = 2 + 4 - 1 = 5$.

Таким образом, не хватает одной степени свободы, т.е. имеется одна

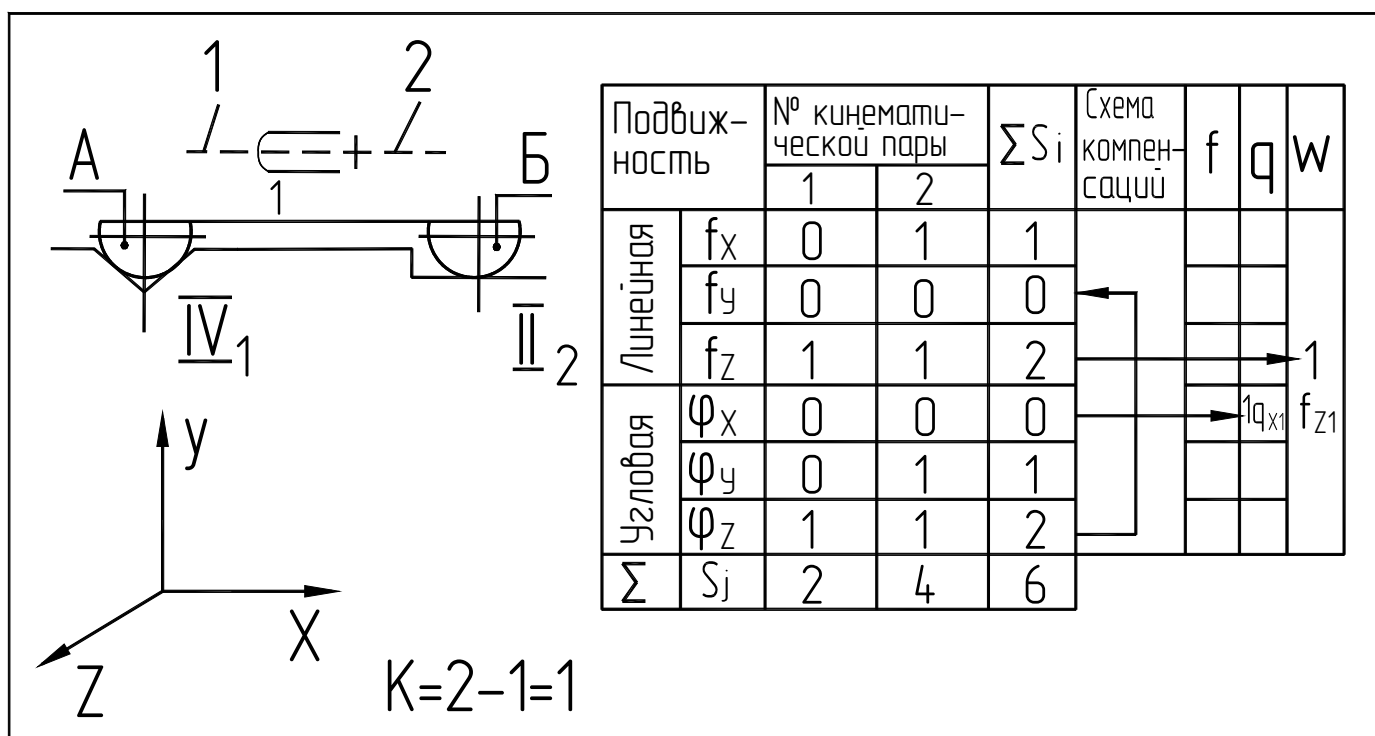


Рис. 3.9. Направляющие

излишняя связь.

Проверим и вариант, в котором введена вращательная пара V класса. В этом случае $K = 3 - 2 = 1$, $S_1 = 2$, $S_2 = 4$, $S_3 = 1$, $w = 1$; тогда $F = 6 \times 1 = 2 + 4 + 1 - 1 = 6$, т.е. механизм собирается без объемных деформаций.

При структурном анализе следует помнить, что угловые подвижности могут заменить только те линейные подвижности, которые направлены перпендикулярно к осям, т.е. подвижность φ_x может заменить одну из подвижностей f_y или f_z . При этом нужно проверить наличие звена, которое при этом повороте дало бы линейное перемещение в нужном направлении.

При конкретном проектировании кинематических схем следует иметь в виду, что устранение лишних подвижностей или связей можно получить не только заменой кинематических пар, но и добавлением или устранением контуров.

Упражнения

Выполнить структурный анализ следующих механизмов:

- 1) арктангенсного механизма (рис. 3.10а),
- 2) арктангенсного механизма с подшипником (рис. 3.10б),
- 3) кулисного механизма (рис. 3.10в),
- 4) зубчатой пары (рис. 3.10г),

- 5) двойной зубчатой пары (рис. 3.10д),
- 6) реечного механизма (рис. 3.10е),
- 7) червячной передачи (рис. 3.10ж),
- 8) червячной передачи с цилиндрическим косозубым колесом (рис. 3.10з);
- 9) направляющих типа «ласточкин хвост» (рис. 3.10и).

При наличии излишних связей внести необходимые изменения в кинетические схемы.

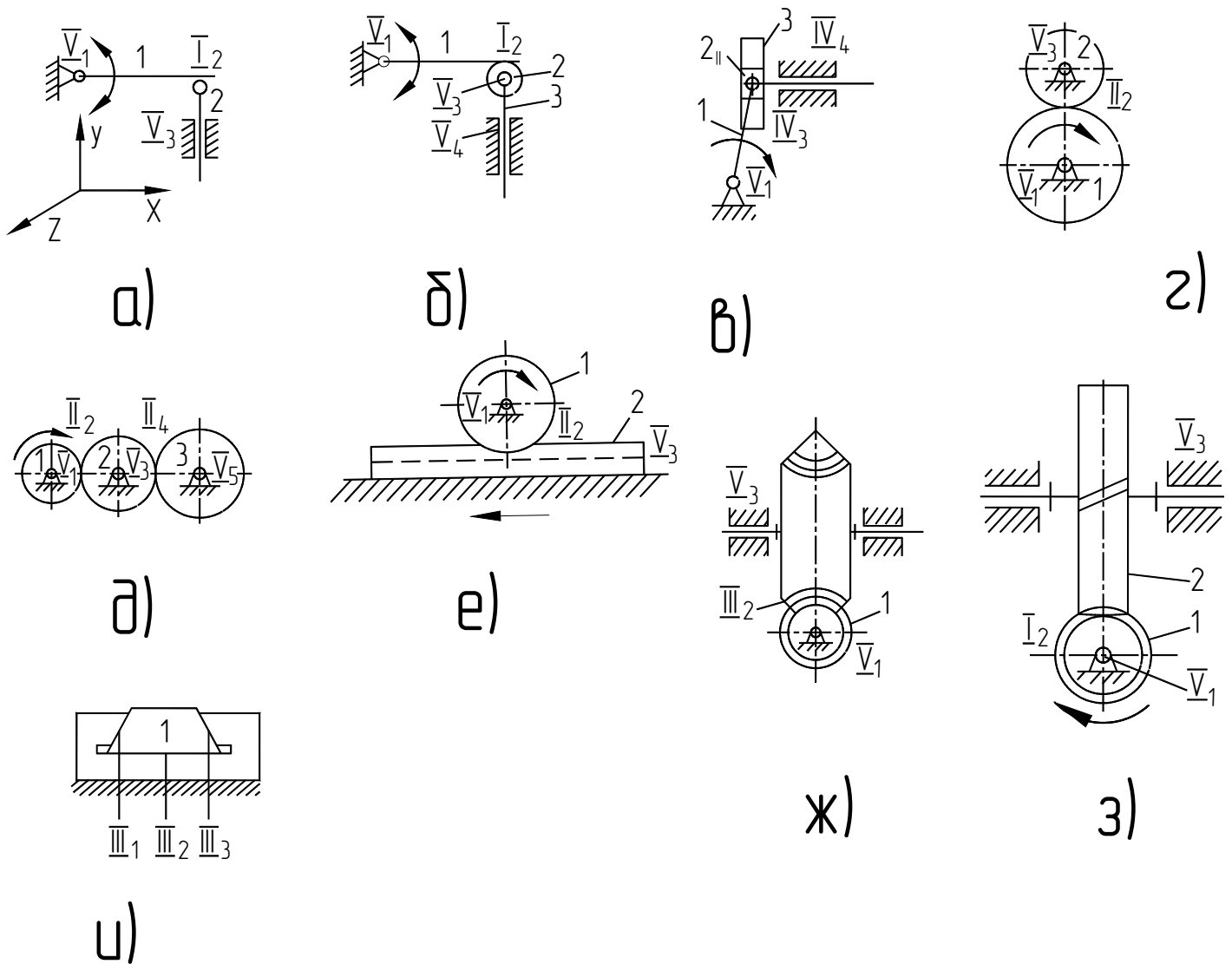


Рис. 3.10. Схемы механизмов

Глава 4. Направляющие для точных перемещений

Направляющими называют устройства для перемещения установленных на них элементов по заданной траектории.

По виду движения направляющие разделяют на две группы:

- направляющие для поступательного движения,
- направляющие для вращательного движения,
- направляющие для обоих видов движения.

В зависимости от рода трения различают направляющие:

- с трением скольжения,
- с трением качения,
- с молекулярным (упругим) трением,
- с воздушным или жидкостным трением.

Для характеристики направляющих используют и другие признаки:

- наличие или отсутствие силового или кинематического замыкания,
- форму тел качения или перемещаемых деталей,
- используемые материалы и т.д.

В общем объёме прибора направляющие составляют значительную часть, иногда до 25 – 30% деталей, а в отдельных приборах определяют точность их функционирования. Не касаясь направляющих, которые подробно описаны в технической и учебной литературе, рассмотрим направляющие оптических приборов, схемы и конструкции которых мало известны, но представляют большой интерес ввиду тех или иных особенностей.

4.1. Направляющие с трением скольжения

На трение скольжения влияют многие физико – механические, конструктивные и технологические факторы, детерминированного и случайного характера. Это связано не только с особенностями самого трения, но и с особенностями работы механизмов (переход от покоя к движению, случайный характер изменения геометрии и шероховатости деталей при перемещении и т.п.). Для уменьшения трения используют смазки разного типа и консистенции.

Трение скольжения используется в направляющих столиков, линзовых систем, объективов и других механизмов. Детали направляющих изготавливаются обычно из латуни или сочетания латуни с алюминиевым сплавом. Скорости перемещения направляющих находятся в пределах от 0,0002 до 15 мм/сек.

Направляющие скольжения имеют достаточно плавное движение и выдерживают большие нагрузки. К числу их недостатков относятся:

- большое трение и большие усилия трогания,
- увеличенные осевые размеры,
- чувствительность к изменениям температуры.

Рассмотрим направляющие скольжения типа “ласточкин хвост”, конструкция которых определяется технологией их изготовления. Они применяются для перемещения призм, зеркал, предметных столиков и других узлов и деталей приборов.

В обычных направляющих типа “ласточкин хвост” (рис. 4.1а) съёмная боковая планка α используется для регулировки зазоров между деталями при сборке. Такая регулировка зазоров производится вручную и достаточно трудоёмка, т.к. связана с ручной шабровкой и притиркой деталей.

Поэтому разработана технология и конструкция направляющих (рис. 4.1б), которые устраняют ручные операции и повышают точность перемещения. В корпусе 1 движется клин 2, скреплённый с планкой 3. Из чертежа видно, что эта конструкция не имеет деталей для пригонки. Работоспособность направляющей обеспечивается технологией изготовления.

Обработка деталей производится на специальном трёхшпиндельном станке. Вначале обрабатывают резцами 4 (рис. 4.1в) и 4' наклонные плоскости в корпусе 1. Резцы установлены в шпиндельных головках 5 и 6, которые при установке ширины паза “ α ” перемещаются в направлении стрелок А. Затем обрабатывают клин 2 (рис. 4.1г) теми же резцами, предварительно раздвинув шпиндели 5 и 6 в направлении Б. При этом ширину клина по размеру “ α ” устанавливают на 0,2...0,4 мм. меньше, чем ширина паза в детали 1. Наконец, деталь 2 вставляют в паз детали 1 и прижимают её снизу, в направлении стрелки В (рис. 4.1д). Поскольку размер “ α ” клина 1 меньше ширины паза в корпусе 2, то клин выступает над верхней поверхностью корпуса. Резцами 7, установленными в вертикальной шпиндельной головке 8, снимают верхний слой толщиной 0,1...0,2 мм. у обеих деталей. В результате образуется общая плоскость деталей 1 и 2, на которую устанавливается планка 3 (рис. 4.1б). Зазоры в таких направляющих не превышают 3...5 мкм, а сами направляющие практически не требуют пригонки.

На рис. 4.2 показана конструкция с трением скольжения, используемая в столике, имеющем вращение вокруг оси Z. Конструкция имеет общую единую поверхность трения А для поворотной части и основания. Такое решение позволяет уменьшить расфокусировку столика по оси Z при вращении поворотной части и уменьшает габариты столика по высоте.

Наиболее ответственные механизмы используются в режиме позиционирования (наводки, совмещения). Позиционирование вдоль оптической оси Z или в плоскости, перпендикулярной к ней, по координатам X и Y с точностью до 0,0001 – 0,0002 мм. необходимо при микроспектрофотометрии клеток, изготовлении и контроле микросхем, линейных и угловых измерениях, совмещении меток в поле зрения и в других случаях.

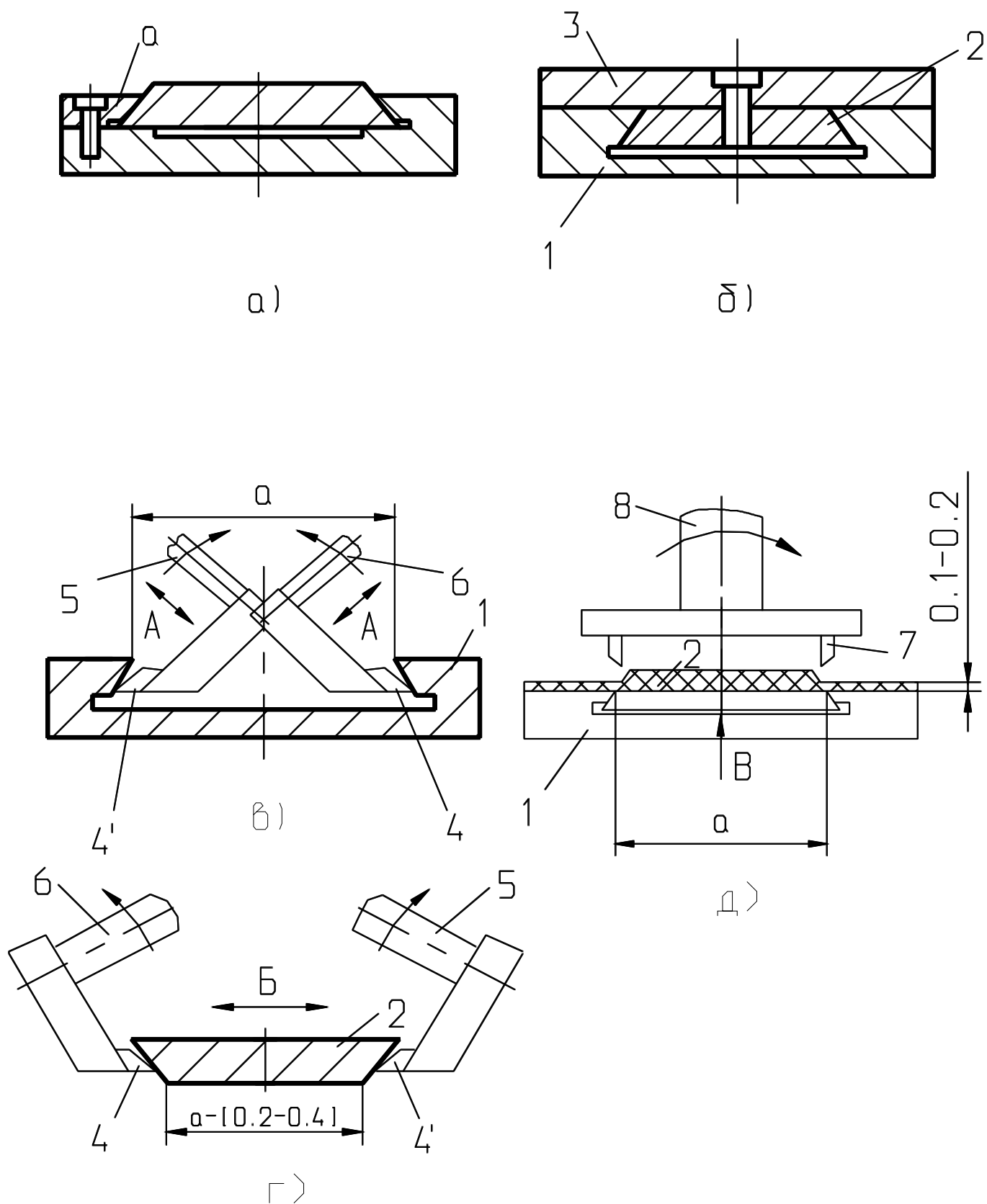


Рис. 4.1. Направляющие скольжения

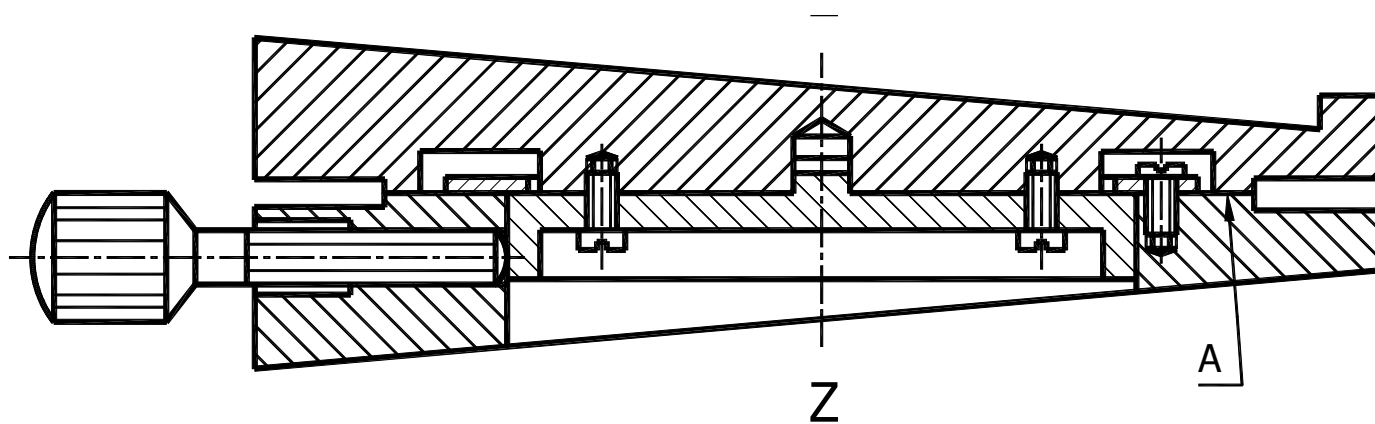


Рис. 4.2. Направляющие скольжения для вращающихся деталей

Для оценки точности позиционирования по осям X и Y используется методика, основанная на измерении зоны разброса. При подведении эталонного объекта к штриху окулярного микрометра с одной стороны наблюдатель прекращает перемещение объекта к штриху в момент их наилучшего совмещения. Затем он измеряет величину недовода или перехода за штрих, определяя тем самым зону разброса.

Существенной причиной, влияющей на точность наводки, является скачкообразный характер движения, вызываемый многими причинами, часть из которых имеет случайный характер. Этот процесс аналогичен понятию «шум» в радиоэлектронике. Поэтому перспективным является применение гелиевых смазок, позволяющих уменьшить величину скачков (снизить «шум» движения направляющих) и демпфирующих точное установочное движение. Ввиду многофакторности процессов, происходящих при трении, считается, что наилучшие результаты о пригодности смазки в механизме дают натуральные испытания. Исследования были выполнены на шести предметных столиках с использованием смазок ф. Nue США, которые рекомендуются для использования в устройствах, где требуется медленное контролируемое перемещение элементов. Использовались смазки малой вязкости марок 779, 774VL и 774L, средней вязкости 774, 774H и высокой вязкости 774VH, 767A и PG44R.

Столики имели двухкоординатное движение по осям X и Y . Направляющая по оси X была выполнена в форме «ласточкин хвост» из латуни и имела соотношение длины к ширине 1:12, а направляющая по оси Y имела отношение 1:1,6. Зазор в направляющих не превышал 5 – 10 мкм. Измерения проводились при подводке эталонного объекта с обеих сторон в пяти точках по каждой координате.

Результаты измерения точности наводки по осям X и Y со

смазками 7 – 2, 779, 774 VL, 774L, 774, 774Н, 774VН, 767А и PG44R приведены в таблице 4.1.

Марки смазок ф. Нуе расположены в порядке увеличения вязкости. При смене смазок проводилась промывка и сушка направляющих. Следует отметить, что конструкция направляющих при их разборке и сборке обеспечивала сохранение исходного зазора. Не изменялись и приводные механизмы. Связь средних значений точности наводки для шести столиков и марок смазки, которые расположены по мере увеличения вязкости, показана на рис. 4.3.

Таблица 4.1

Точность наводки, мкм

№ столика	Координата X									
	7-2	779	774 VL	774L	774	774Н	774 VН	767А	PG 44R	Ср. знач.
1	1,867	2,3	1,112	1,273	0,915	0,370	0,083	0,06	0	0,886
2	3,625	2,048	1,106	0,53	0,653	0,325	0,401	0,817	0,244	1,083
3	2,68	3,145	0,961	0,342	0,995	0,205	0,046	0,152	0	0,948
4	3,143	4,728	1,178	1,348	0,399	0,550	1,079	0,235	0	1,407
5	2,8	0,348	0,253	2,026	0,455	0,635	0,355	0,157	0	0,781
6	2,808	1,28	0,252	1,25	0,852	0,520	0,099	0	0	0,784
Ср. знач	2,821	2,308	0,81	1,136	0,712	0,434	0,344	0,237	0,041	0,881
№ столика	Координата Y									
	7-2	779	774 VL	774L	774	774Н	774 VН	767А	PG 44R	Ср. знач.
1	4,97	3,46	2,52	2,94	0,735	0,349	0	0,291	0	1,696
2	7,498	4,553	1,068	0,748	0,248	0,285	0,097	0	0,307	1,645
3	8,995	5,038	0,743	0,862	0,423	0,063	0	0	0	1,791
4	10,03	3,265	1,547	0,844	0,418	0,197	0,448	0	0	1,860
5	17,02	4,4	3,735	1,135	0,115	0,728	0,249	0	0	3,043
6	14,12	3,04	3,799	0,988	0,059	0,157	0	0	0	2,462
Ср. знач	10,44	3,959	2,235	1,025	0,333	0,297	0,132	0,048	0,051	2,083

Из данных таблицы видно, что точность наводки увеличивается при росте вязкости. При испытаниях выяснилось, что смазки с высокой вязкостью значительно повышают усилия трогания направляющих и моменты на приводах.

Повторные испытания столиков после года хранения показали, что

точность наводки сохранилась в пределах ошибки измерения. Через два и три года существенных изменений также не произошло.

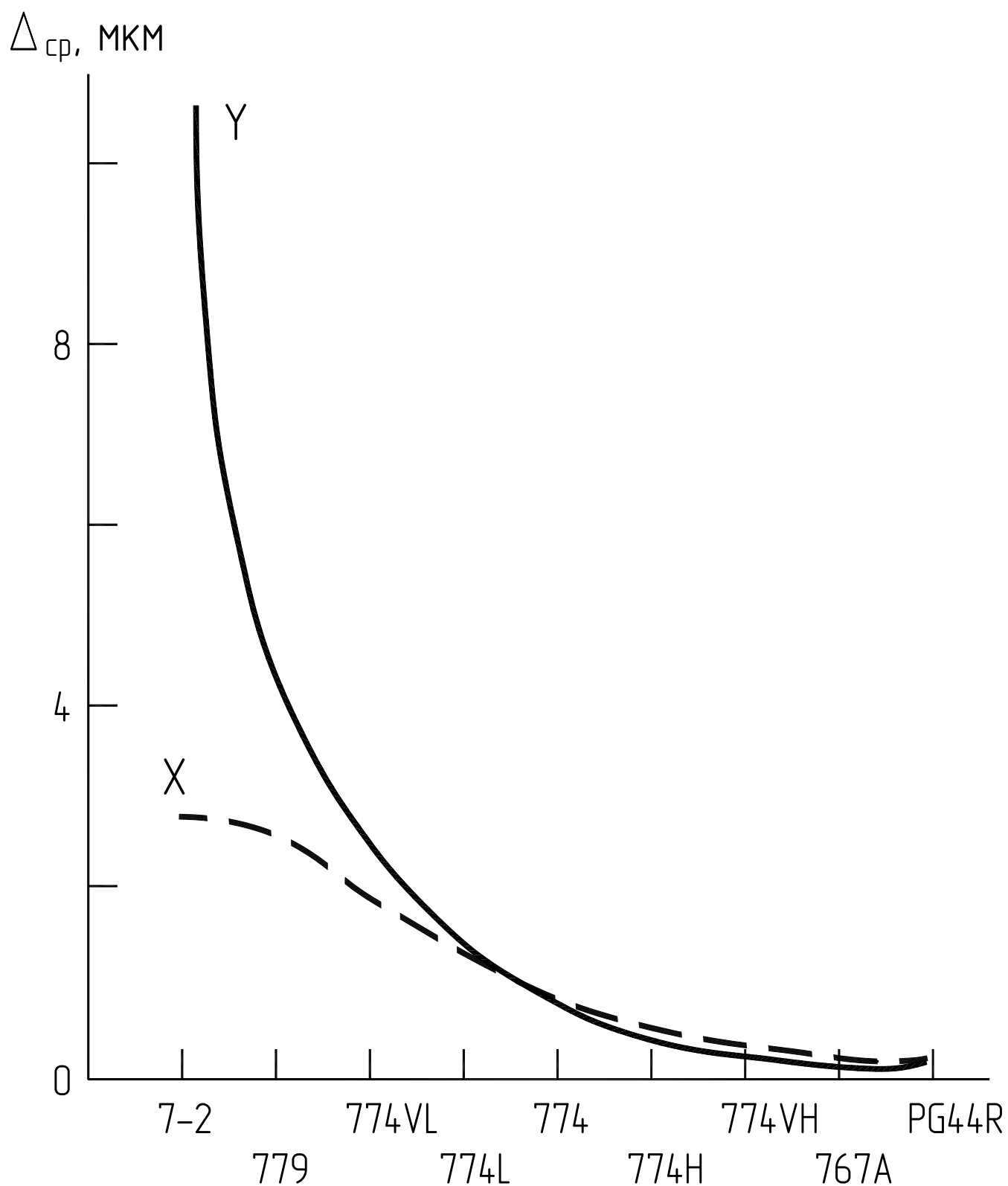


Рис. 4.3. Связь среднего значения точности наводки $\Delta_{ср}$ и марки смазки

Из полученных данных следует:

- применение демпфирующих смазок серии 774 обеспечивает точность наводки направляющих до 1 мкм;
- точности наводки разных столиков, смазанных одной смазкой, могут значительно отличаться, что показывает большое влияние на точность наводки качества изготовления деталей и сборки.

Таким образом, применение демпфирующих гелиевых смазок позволяет существенно улучшить качество движения точных направляющих оптических приборов.

При определении заряда, импульса и скорости заряженных частиц с помощью измерения координат Y на следах частиц, зафиксированных в толстослойных фотоэмульсиях, а также при фотометрировании клеток биологических объектов на микроскопах, при изготовлении дифракционных решёток необходимо обеспечить перемещение узлов с отклонениями от прямолинейности движения до 0,03 мкм. Это требование к перемещению вытекает из того факта, что значение координат Y у частиц высоких энергий, размеры фотометрируемой клетки и допустимые отклонения штриха решётки составляют десятые доли микрометра.

Прямолинейность движения определяется случайными отклонениями и характеризуется «шумом» столика. Под «шумом» столика понимается среднее значение вторых разностей ординат Y , отнесённое к определённом шагу перемещений. «Шум» столика характеризует изменение угла наклона движения каретки при перемещении её через шаг (змеевидность перемещения).

Для исследования характера движения направляющей – «шума» измеряют смещение столика по оси Y с помощью многолучевого интерференционного устройства, схема которого показана на рис 4.4а.

Эталонное зеркало 1 установлено на каретке столика. Интерференционные полосы локализируются в зазоре между зеркалом и пластиной 2 с полупрозрачным покрытием. При изменении величины зазора полосы смещаются, и с помощью окулярного микрометра 3 производят измерение этих смещений через интервалы перемещения столика, обычно равные 0,5 мм.

Обработка результатов измерений производится в следующем порядке: определяют первые разности $\Delta y_1 = y_2 - y_1; \dots; \Delta y_n = y_{n+1} - y_n$; затем вычисляют вторые разности $D_1 = \Delta y_2 - \Delta y_1; \dots; D_{n-1} = \Delta y_n - \Delta y_{n-1}$.

В обоих случаях разности определяют с учётом знака.

«Шум» столика равен

$$D = \sum D_i / n. \quad (4.1)$$

Первые разности не могут быть взяты в качестве критерия оценки качества направляющих, т.к., если эталонное зеркало

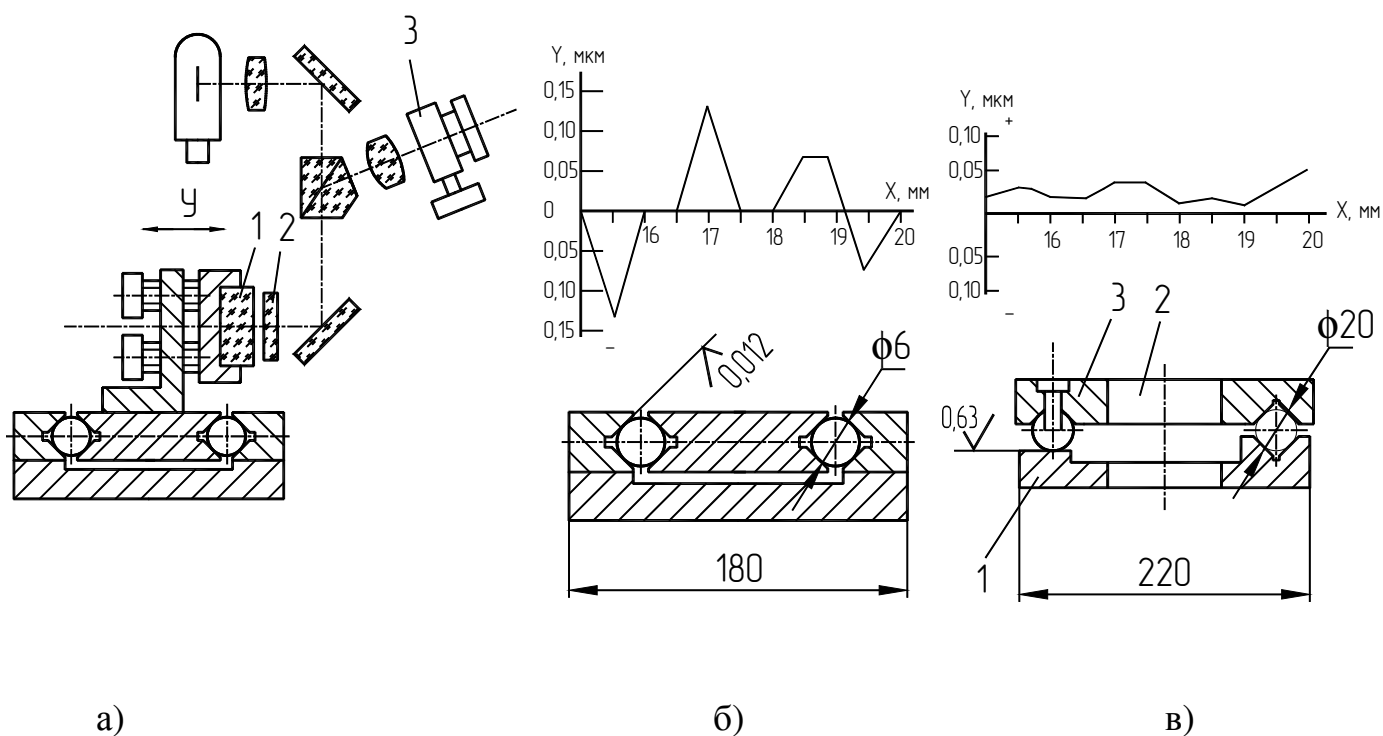


Рис. 4.4

выставлено непараллельно движению каретки, влияние наклона с помощью первых разностей не может быть учтено. Вторые разности позволяют исключить эту погрешность и другие погрешности, имеющие систематический постоянный характер.

На рис. 4.4б представлен график движения шариковых призматических направляющих, изготовленных достаточно тщательно. Их беговые дорожки имеют шероховатость $Ra = 0,012$ мкм, шарики отсортированы по овальности, огранности и отклонению от номинального значения диаметра до 0,5 мкм.

Для этих шариковых направляющих среднее значение «шума» составляет 0,2 – 0,4 мкм на интервале в 500 мкм, что значительно превышает точность движения, необходимую для отдельных измерений.

Движение шариковых направляющих можно сравнить с телегой, едущей по булыжной мостовой. В то же время направляющие скольжения позволяют получить значительно более высокие результаты (их перемещение подобно движению саней по той же мостовой). В подобных случаях используют направляющие скольжения (рис. 4.4в), в которых трущиеся поверхности изготовлены из фторопласта и чугуна. Коэффициент трения фторопласта при движении равен 0,03 – 0,04, что и является причиной его использования.

На чугунном основании 1 расположен один угловой паз и плоскость, поверхности которых отшлифованы. На верхней подвижной каретке 2 неподвижно установлены три фторопластовых цилиндра 3.

Каретка столика приводится в движение с помощью винтового механизма.

Из графика движения таких направляющих видно, что случайные смещения по оси Y не превышают 0,02 мкм, т.е. на порядок меньше, чем у направляющих качения. Однако, у этих направляющих имеется и недостаток – при изменении направления движения происходит скачок измерительной каретки на 0,3 – 0,8 мкм. Структурный анализ такой конструкции и её недостатки рассмотрены в гл. 3 данного пособия.

Переход от точечного (дифференциального) контакта к контакту по линии (интегральному) позволяет существенно уменьшить случайные отклонения. Это позволяет предположить, что в механизмах, от которых требуется стабильность, целесообразно взамен высших пар применять низшие и создавать смешанные пары (см. гл.3).

4.2. Направляющие качения

Направляющие качения имеют значительно меньшее трение и усилие трогания. Они нечувствительны к колебаниям температуры и нетребовательны к выбору смазки. Но они часто имеют большой габарит и более высокую стоимость изготовления в отличие от направляющих с трением скольжения.

В направляющих с трением качения используют шариковые, роликовые или игольчатые тела качения. Мёртвый ход в них не превышает 2...4 мкм.

Различные конструкции, используемые в узлах с трением качения, показаны на рис. 4.5.

На рис. 4.5а изображена типовая конструкция направляющих, у которых и подвижная каретка 1 и неподвижные боковые направляющие 2 изготовлены в виде монолитных деталей из стали 20 или ШХ – 15 с последующей цементацией и закаливанием до твердости HRC 55...60. Такая конструкция характеризуется длительным циклом изготовления деталей и их высокой трудоёмкостью.

На рис. 4.5б приведены сборные направляющие, в которых используются различные вкладыши, выполненные в виде угольников 1, проволок 2, проволок со скосами 3 и плоских прокладок 5. В таких конструкциях направляющие 4 и каретки 6 могут быть изготовлены из алюминиевых сплавов или стали без термообработки, что существенно упрощает и удешевляет изготовление. Отклонение от прямолинейности и неплоскости не должны превышать 0,005...0,01 мм. Для этого, чтобы не допустить большого разброса размера “ u ”, обе направляющие часто шлифуют вместе, попарно, располагая их на станке последовательно, прижатыми к общей плоскости. Расстояние L мм между крепёжными деталями на боковых направляющих 4 можно

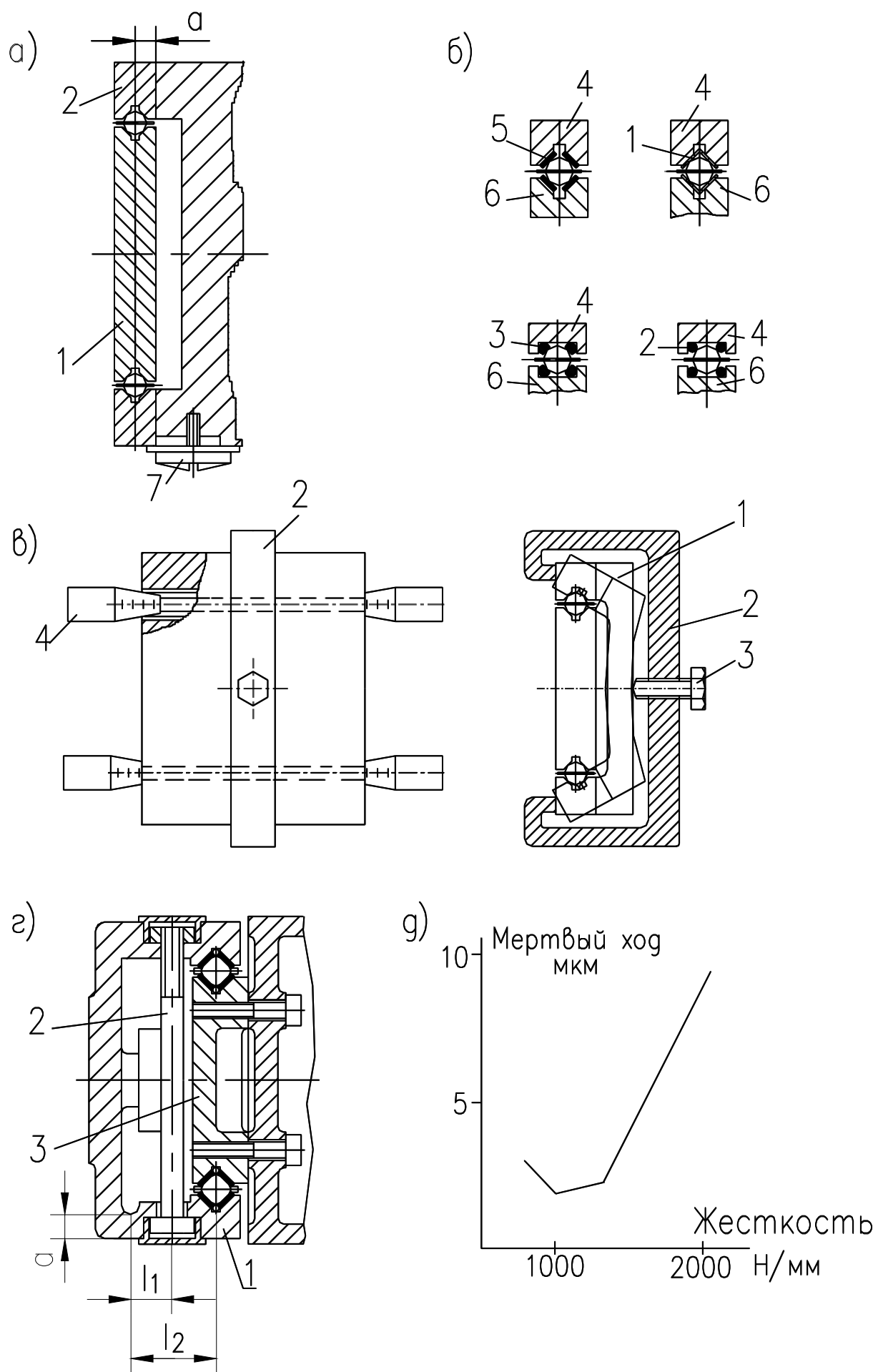


Рис. 4.5. Направляющие качения для поступательного движения

определить по формуле:

$$L = 5,5 \cdot \sqrt[4]{h}, \quad (4.2)$$

где h – высота направляющих, мм.

Направляющие должны собираться с натягом в 2...3 мкм, который создаётся с помощью винтов 7 (см. рис. 4.5а). Используется и специальная технология сборки, показанная на рис. 4.5в. Основание направляющих 1 вместе с боковыми планками деформируется с помощью скобы 2 и болта 3. Величина деформации контролируется с помощью конических пробок 4, на которые нанесены деления, соответствующие изменению диаметров конусов через 2...5 мкм. После установки направляющих в канавки насыпают шарики, заранее рассортированные по диаметру. Величина деформации подбирается такой, чтобы после удаления скобы 2 направляющие были собраны с требуемым натягом шариков, который предварительно определяется экспериментально.

На рис. 4.5г приведена конструкция с упругой боковой направляющей 1. Сжатие этой направляющей и регулирование натяга производится с помощью винтов 2. Изгиб происходит благодаря деформации тонкой перемычки толщиной δ , равной 3...5 мм. Корпус с направляющими 1 изготавливается из алюминиевых сплавов, а каретка 3 – из стали, латуни или алюминиевых сплавов. Конструкция прокладок под шарики выполнена по одному из вариантов, показанному на рис. 4.5б. Исследования показали, что с помощью винтов 2 (см. рис. 4.5 в) можно оптимизировать соотношение между мёртвым ходом и жёсткостью конструкции направляющих (рис. 4.5д).

Выполним расчёт такой конструкции. На рис. 4.5 г обозначено:

l_1 – расстояние от перемычки до винта, 30 мм;

l_2 – расстояние от перемычки до шарика, 40 мм;

δ – толщина перемычки, 4 мм.

Можно принять, что деформация упругой направляющей δ находится в пределах $\delta = \pm 0,2$ мм, поскольку допуск на расстояние между шариками составляет у каждой детали $\pm 0,1$ мм.

Перемещение винта δ_B для получения такой деформации равно $\delta_B = \delta \times l_1 / l_2 = 0,2 \times 30 / 40 = 0,15$ мм.

Усилие P для изгиба направляющей

$$P = \frac{\delta_B \times l \times \delta^3 \times E}{4 \times l_1^3} = \frac{0,15 \times 80 \times 4^3 \times 7000}{4 \times 30^3} = 498 \text{ Н}, \quad (4.3)$$

где l – длина направляющей, 80 мм,

E – модуль упругости алюминиевых сплавов, равный $70\,000\text{ Н / мм}^2$.

Проверим напряжение изгиба в перемычке

$$\sigma_{II} = \frac{6P \times l_1}{1 \times d^2} = \frac{6 \times 498 \times 30}{80 \times 4^2} = 70\text{ Н / мм}, \text{ что допустимо.}$$

Распределим нагрузку зажима на три регулировочных винта $P_1 = 498 / 3 = 166\text{ Н}$.

Внутренний диаметр винта d при допустимом напряжении на растяжение $G_p = 80\text{ Н / мм}$ $d_1 = 1,13 = 1,13 = 2,34\text{ мм}$.

Примем диаметр резьбы регулировочного винта равным 4 мм , т.к. предполагается, что корпус с направляющими будет изготовлен литьём под давлением с шагом резьбы более $0,5\text{ мм}$.

Проверка корпуса на срез резьбы и смятие показали, что напряжения не превосходят допустимых.

На рис. 4.6а представлена конструкция шариковых направляющих с возвратом тел качения 1 по замкнутой траектории, позволяющая увеличить перемещение каретки 2 по сравнению с обычной конструкцией направляющих.

В измерительных приборах широко используются двухкоординатные щупы, с помощью которых осуществляется точное измерение деталей. Кинематические схемы щупов в зависимости от выполняемых функций могут быть достаточно сложными. Интерес представляет конструкция вертикального перемещения штока щупа. Щуп состоит из втулки 1 (рис. 4.6б), шариков 2, сепаратора 3 и штока 4.

Втулка имеет внутренний диаметр 10 мм , допуск цилиндричности которого не превышает 2 мкм , а допуск круглости $0,2\text{ мкм}$.

Такие же требования предъявляются и к поверхности штока, наружный диаметр которого равен $6,85\text{ мм}$.

Разработана технология изготовления и сборки таких направляющих.

Втулка 1 и шток 4 аттестуются по внутреннему и наружному диаметру. Шарик 2 доводится по диаметру с целью обеспечения размерности, не превышающей $0,2\text{ мкм}$, а затем разбиваются на группы по диаметру с интервалом $0,2\text{ мкм}$. Шарик комплектуется со штоком и втулкой таким образом, чтобы обеспечить натяг в пределах $1,5...3\text{ мкм}$.

На рис. 4.6в изображена конструкция сепаратора. В сепаратор вкладывается 40 шариков, по 20 с каждой стороны сепаратора, длина которого равняется $50...60\text{ мм}$. Шарик располагается в отверстиях,

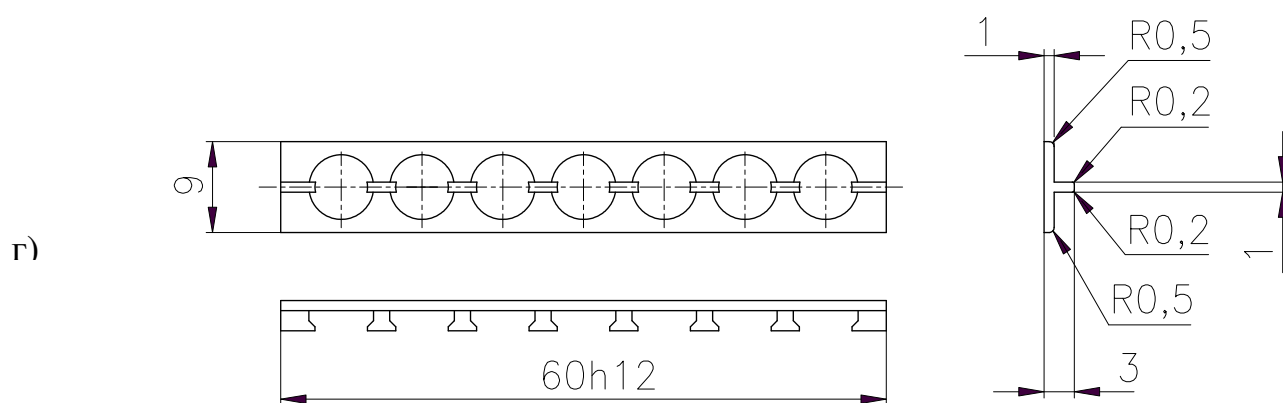
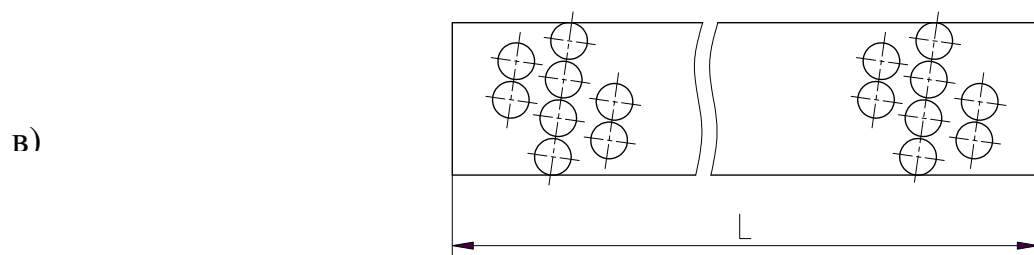
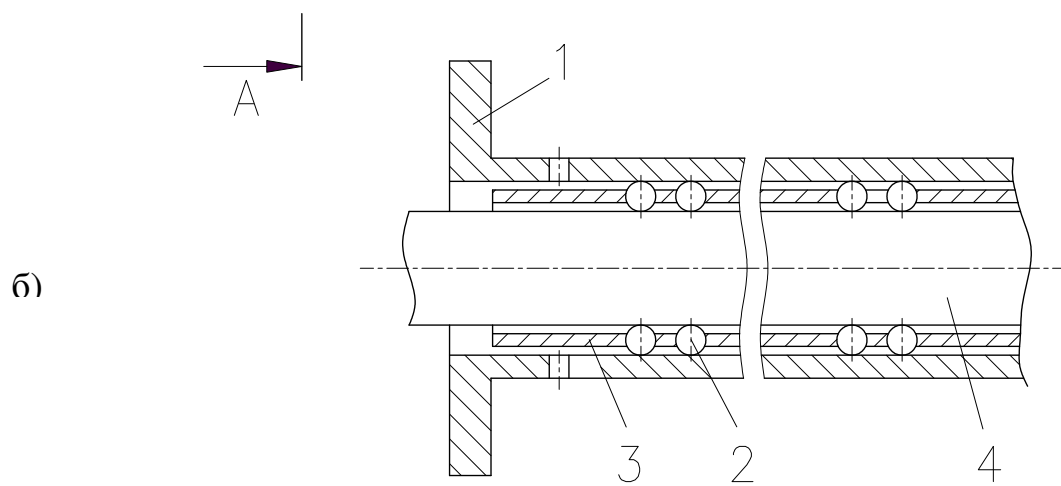
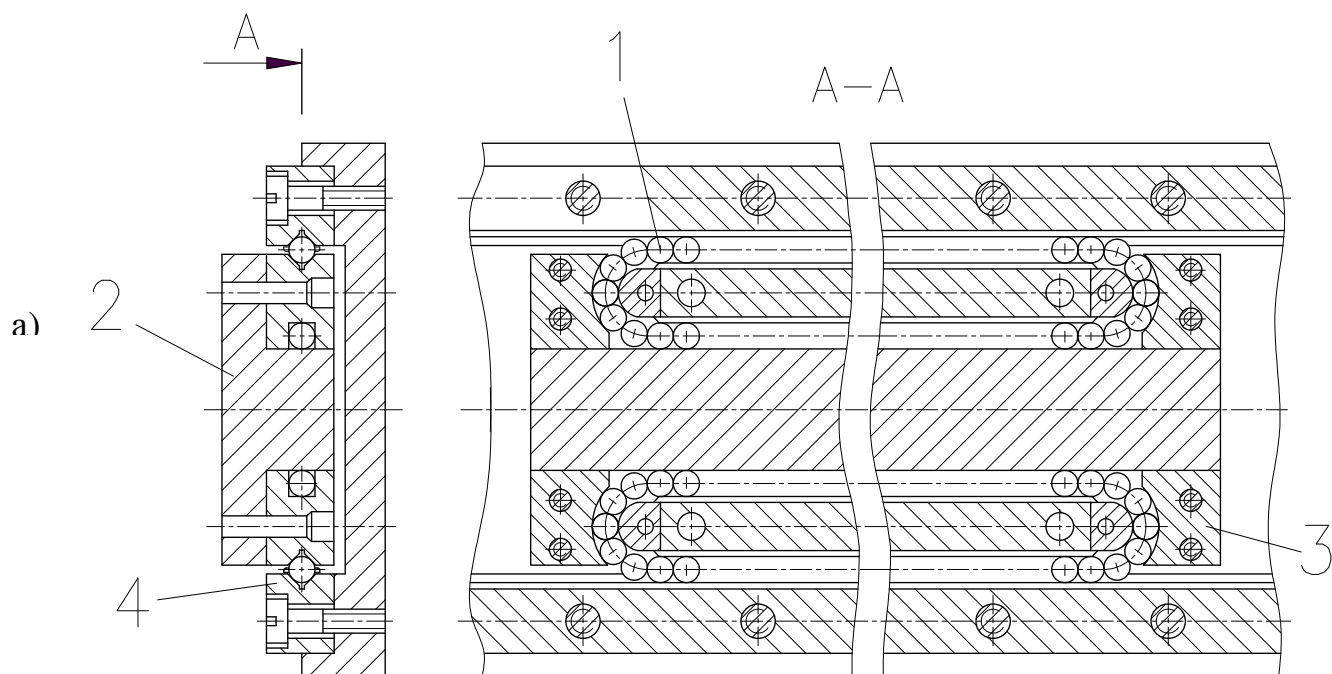


Рис. 4.6

диаметр которых приблизительно на 0,1 мм больше диаметра шариков. Отверстия в сепараторе располагаются по спирали с шагом 3 мм, что обеспечивает как более лёгкую сборку, так и перемещение шариков по разным дорожкам. Каждый шарик нагатовывает свою собственную дорожку. Перемещение штока находится в пределах 3...5 мм.

На рис. 4.6г показана конструкция сепаратора, используемая в направляющих, показанных на рис. 4.5, и упрощающая сборку и установку шариков в корпус.

В отличие от обычных сепараторов, выполненных в виде плоских металлических штампованных деталей с отверстиями под шарики, в этом сепараторе, изготовленном из пластмассы, предусмотрены выступы, между которыми укладываются шарики, и вся обойма затем устанавливается в корпусе направляющих.

Из направляющих для вращательного движения следует остановиться на конструкции направляющих для поворотных планшайб измерительных столов универсальных измерительных микроскопов (рис. 4.7а).

Планшайба 1 с предметным стеклом 2, на которое устанавливаются контролируемые детали, при своём вращении вокруг оси ОО опирается на шарики, находящиеся в сепараторе 4. Торцевые поверхности планшайбы 1 и корпуса 5, контактирующие с шариками, доводятся до 4 интерференционных полос (допуск плоскостности в пределах 1...1,5 мкм).

Планшайба и корпус изготавливаются из стали ШХ – 15. Шарики комплектуются по диаметру, их разноразмерность не превышает 0,2 мкм. Таким образом, торцевое биение верхней поверхности предметного стекла при вращении планшайбы не превышает 2...3 мкм.

Стабильность положения оси вращения ОО определяется правильностью геометрической формы боковой поверхности планшайбы 1 по диаметру D , которым она опирается на две планки 6, расположенные под углом 120° . Планки для уменьшения трения выполнены из металлокерамики. Поджим планшайбы к планкам осуществляется пружиной 7 с помощью шарикоподшипника 8, установленного на рычаге 9, поворачивающегося вокруг оси 10. Допуск круглости диаметра D не превышает 2 мкм.

Если под воздействием каких-либо усилий в процессе вращения планшайба отойдёт от планок, с помощью подшипника 8 она вновь вернётся в исходное положение. При этом, если на предметном столе будет установлена даже максимально допустимая по весу деталь ($P = 200 \text{ Н}$), усилие F , необходимое для возврата планшайбы, составит всего 0,6 Н ($F = Pf$, где f – коэффициент трения качения, лежащий в пределах 0,002...0,005). Поэтому и момент M , необходимый для поворота планшайбы, будет невелик. Он может быть вычислен по

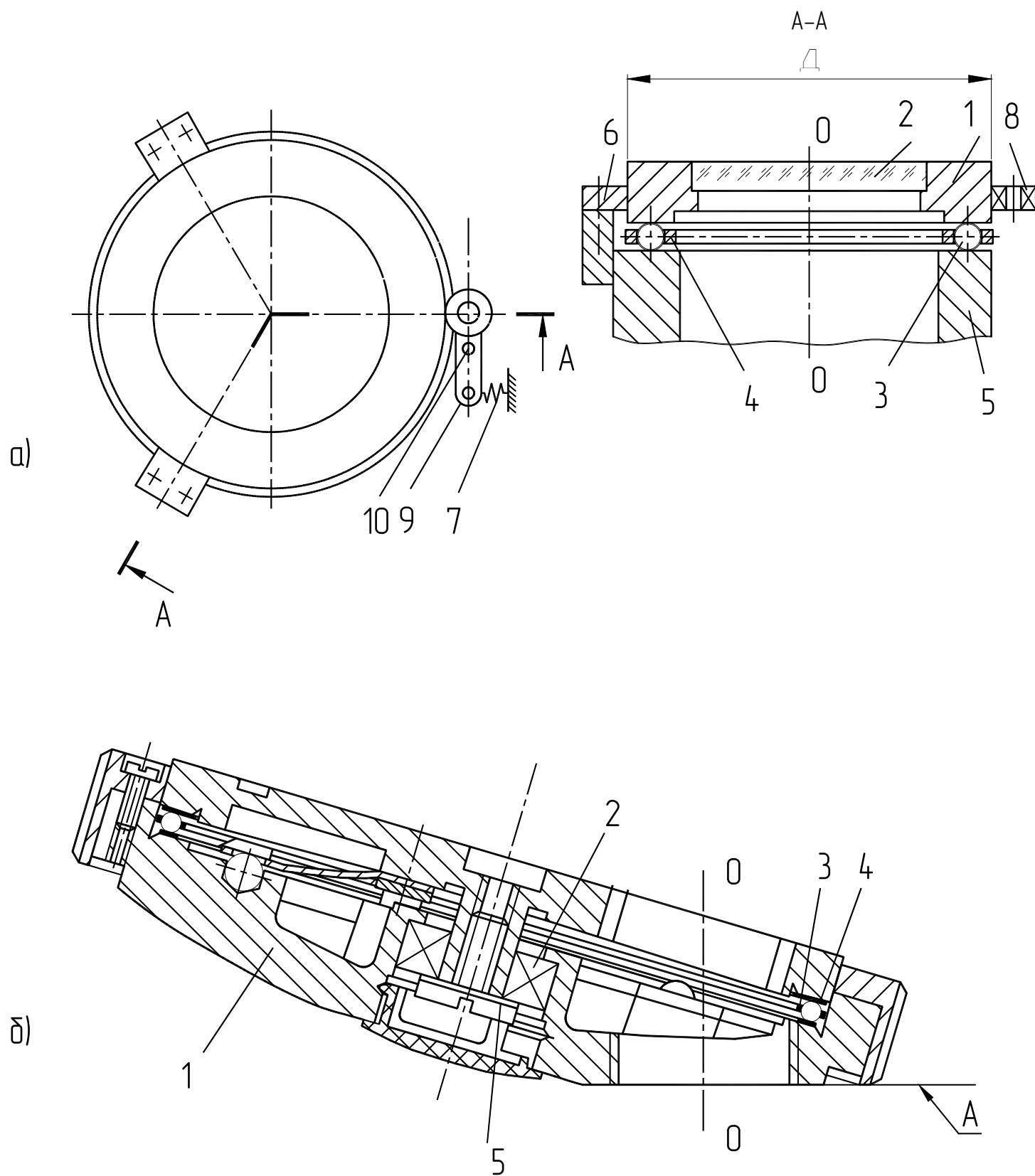


Рис. 4.7. Направляющие качения для вращающихся деталей

формуле (при угле между планками, равным 120°):

$$M = 2F \frac{D}{2} f + \frac{Pd_c}{2} f + \frac{D}{d_{\text{п}}} M_{\text{п}} ,$$

где P – вес планшайбы с контролируемой деталью,
 d_c – диаметр, на котором расположены шарики в сепараторе,
 f – коэффициент трения качения,
 $d_{\text{п}}$ – наружный диаметр подшипника,
 $M_{\text{п}}$ – собственный момент трения в подшипнике.

На рис. 4.7б дана конструкция револьвера, в который устанавливаются сменные объективы. Допуск центрирования сменных объективов составляет 10...15 мкм и допуск перпендикулярности опорных торцов A к оптической оси $ОО$ составляет не более 1'. Смещение объективов вдоль оптической оси не должно превышать 5...10 мкм.

В старой конструкции револьверов барабан 1 устанавливался на центральной конической оси. Такая консольная конструкция не обеспечивала точностных требований и её жёсткость была недостаточна.

В новой конструкции барабан револьвера центрируется стандартным подшипником 2, радиальное биение которого не превышает 3 мкм, и опирается наружным диаметром на насыпной подшипник 3. Качение шариков происходит по кольцам 4, изготовленным из пружинной стали толщиной 0,2...0,3 мм. Такая конструкция револьвера обеспечила необходимую точность и жёсткость. Пружинная шайба 5 производит силовое замыкание револьвера.

На рис. 4.8 показаны игольчатые направляющие с клиновидной (рис. 4.8а), круглой (рис. 4.8б) и прямоугольной (рис. 4.8в) подвижными каретками. Направляющие характеризуются высокой жёсткостью конструкции и простой сборкой. Ролики 1 установлены в сферических самоустанавливающихся подпятниках 2, что упрощает сборку и снижает требования к изготовлению оснований 3 и, частично, к кареткам 4. Допуск на пирамидальность рабочих поверхностей кареток 4 в пределах их перемещения не должен превышать упругой деформации, возникающей в месте контакта роликов 1: $\delta \leq k_p \times q$, где k_p – коэффициент податливости, равный 0,07 мкм × мм / Н, для стальных закалённых направляющих; q – погонная нагрузка на единицу длины ролика в Н/мм, действующая по нормали к плоскости направляющей.

Для обычных условий, в которых работают подвижные каретки ($q = 10$ Н / мм, диапазон перемещения – 2...5 мм), пирамидальность находится в пределах 5...10'.

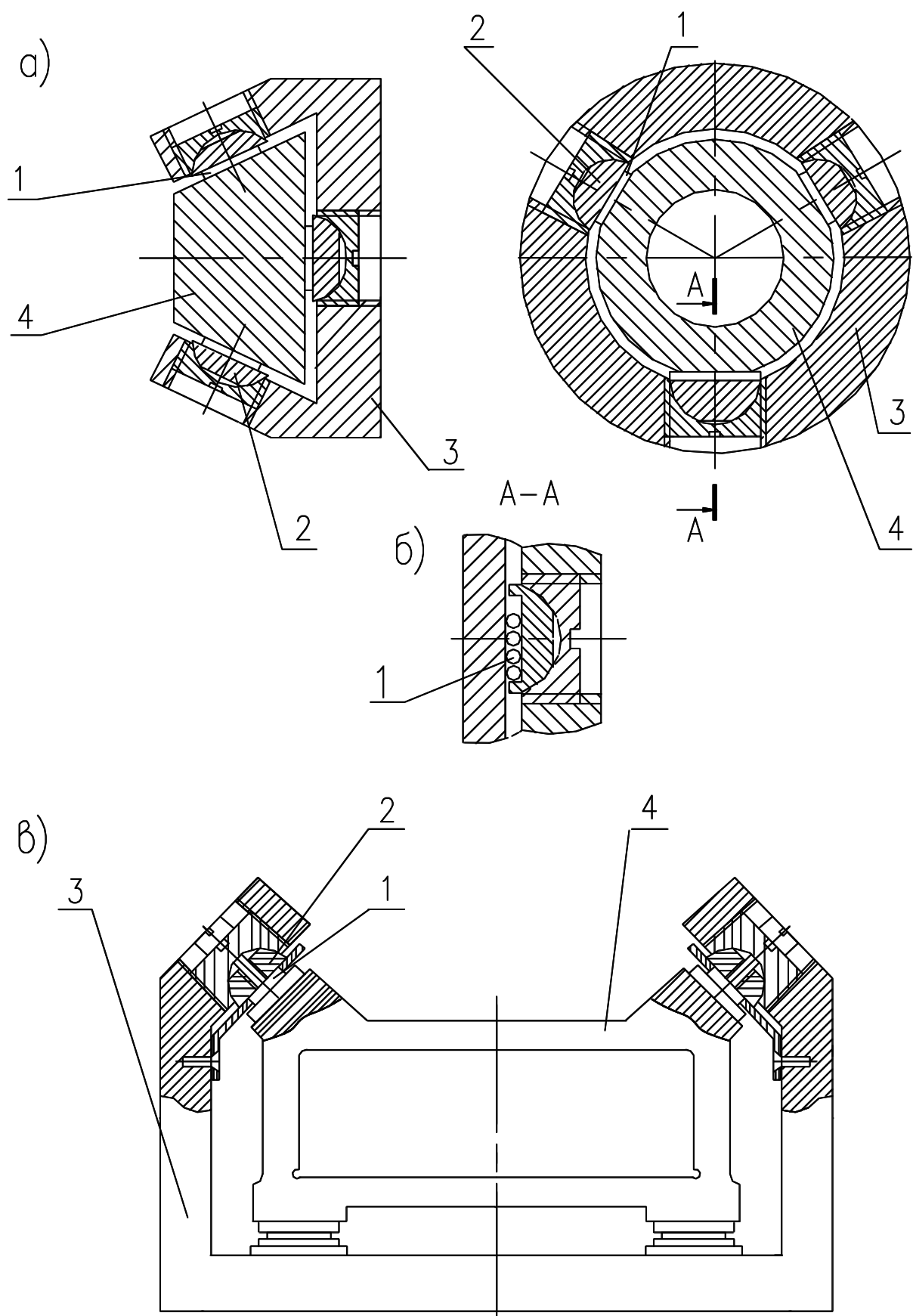


Рис. 4.8. Игольчатые направляющие

4.3. Направляющие с молекулярным трением и другие типы направляющих

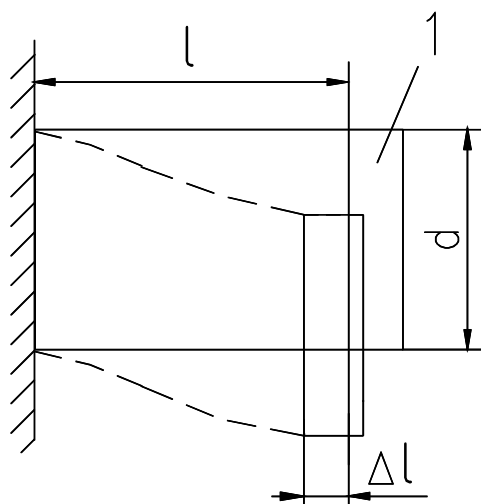
В случаях, когда требуется минимальный мёртвый ход, высокая воспроизводимость траектории движения, повышенная изнosoустойчивость и отсутствие необходимости смазки, используют направляющие с трением упругости – пружинные направляющие (рис. 4.9). Обычно используют направляющие с плоскими пружинами в виде простого параллелограмма (рис. 4.9а) или двойного параллелограмма (рис. 4.9б), предложенного Клеем в 1888 г. для измерения вибраций. При небольших углах изгиба траектория, описываемая концом пружины, близка к дуге окружности с радиусом $R = 3/4l$. При изгибе пружин у параллелограмма происходит смещение основания 1 на величину Δl . При применении двойного параллелограмма смещение Δl , возникающее при изгибе пружины 2 в одном направлении, компенсируется таким же смещением, но направленным в другую сторону, второго параллелограмма, образованного пружинами 3.

Для повышения точности перемещения используют принудительное перемещение второго параллелограмма в два раза медленнее с помощью рычажного или иного механизма. В механизме точной подачи (рис. 4.9в), обеспечивающем перемещение с “шумами” не более 0,01 мкм на длине 100 мкм, принудительное движение на параллелограммы в отношении 1:2 передаётся стержнем. При вращении винта 4 через рычаг 5 пружины 7 создают силовое замыкание механизма. На точность механизма большое влияние оказывает разброс длины пружин 1 и размеров d , их толщины, ширины, прогиба, направлении проката и других свойств пружин. Для выполнения требований по точности перемещения применяют совместную обработку деталей по размерам d , изготавливают пружины из одного рулона ленты и используют другие технологические приёмы. Пружины изготавливаются из стали 70C2XA толщиной 0,2...0,5 мм и шириной 20...30 мм.

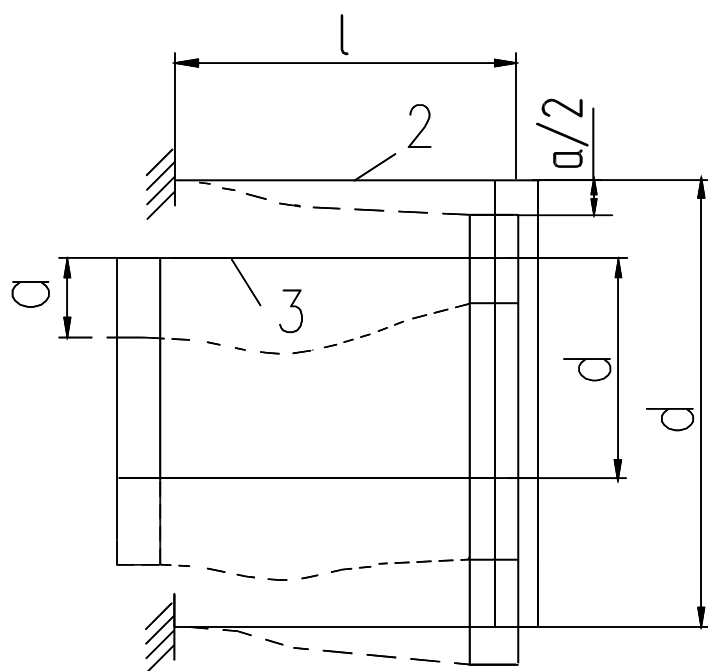
В спектрометрах с интерференционной селективной модуляцией и в Фурье – спектрометрах модуляцию светового потока производят с помощью перемещения одного из зеркал. При этом, с целью получения максимальной разрешающей способности, перемещение зеркала может достигать 1 – 2 м. При перемещении зеркала на всю длину его наибольший наклон не должен превышать $1''$, поэтому особое внимание обращается на конструкцию направляющих зеркал, в качестве которых используют пружинные, газовые и другие особо точные направляющие.

Пружинные направляющие сканирующего зеркала Фурье – спектрометра показаны на рис. 4.10а. Пружины 1 установлены на

а)



б)



в)

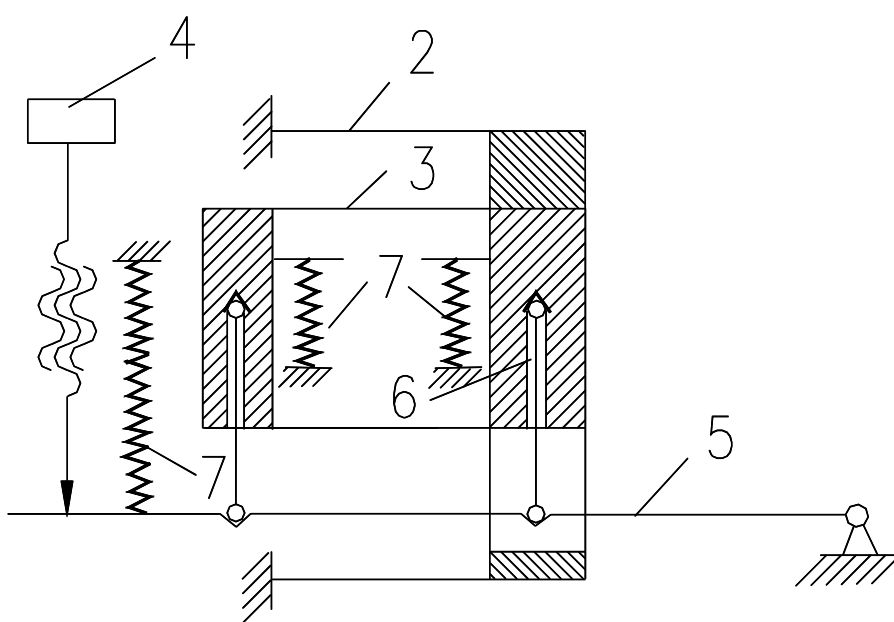


Рис. 4.9. Пружинные направляющие

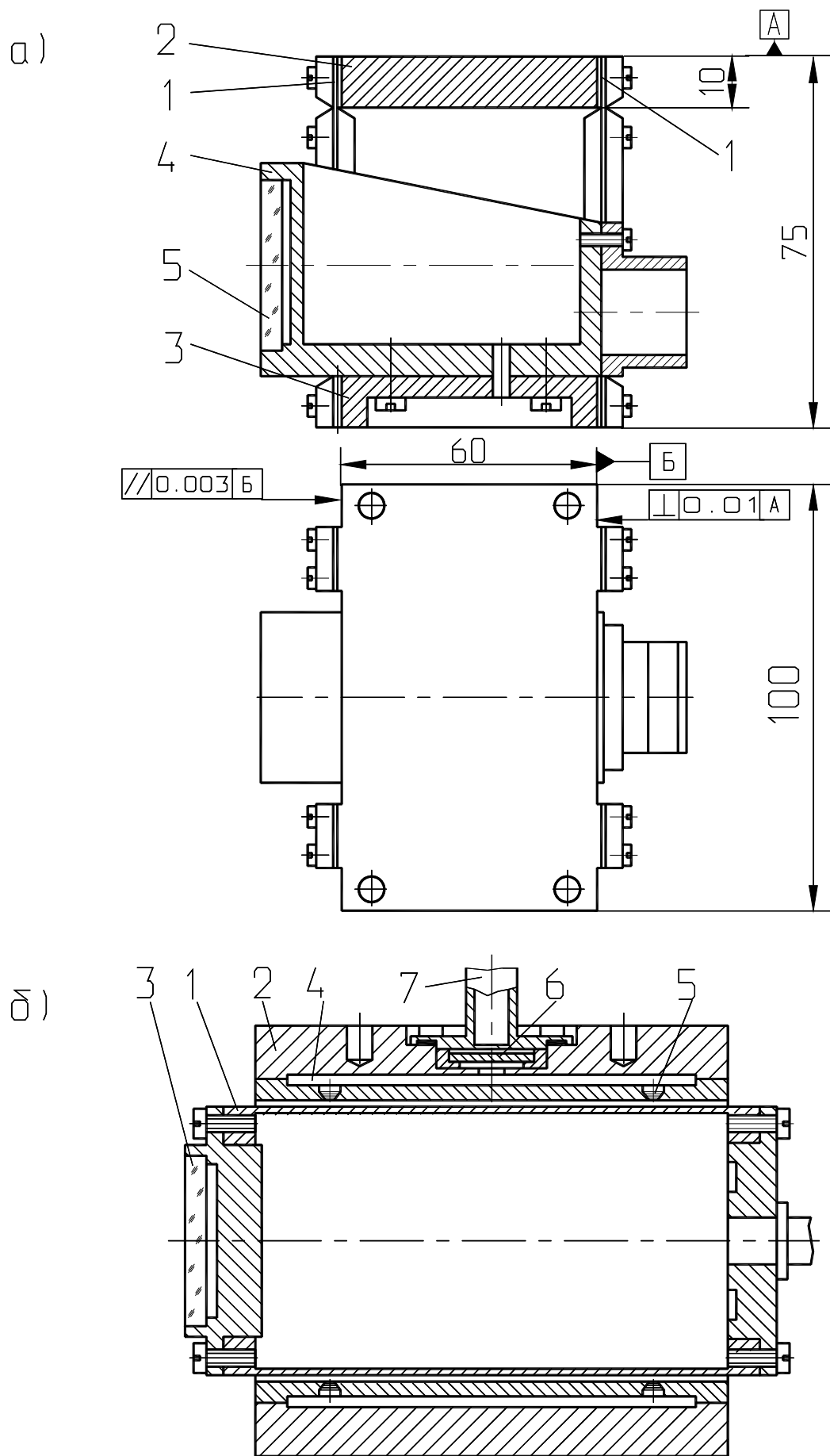


Рис. 4.10. Пружинные и газовые направляющие

неподвижном основании 2 и на подвижном основании 3. На последнем в оправе 4 закреплено зеркало 5.

Угол наклона зеркала β вследствие отклонения длин оснований 2 и 3, разности длин сторон каждого основания и различия длин пружин определяется формулой

$$\beta = \frac{\delta \Delta l}{hl} \sqrt{\left(1 \pm \frac{\delta \Delta h}{2h\Delta l}\right)^2 + \left(\frac{h}{b}\right)^2}, \quad (4.4)$$

где δ – перемещение зеркала,

l – длина оснований,

Δl – разность длин оснований,

h – длина пружин,

Δh – разность длин пружин,

b – ширина пружин.

После упрощения формула примет вид

$$\beta = (\delta / b)(\Delta l / l). \quad (4.5)$$

При перемещении зеркала на 3 мм и при выполнении условия $\Delta h = \Delta l = 0,01$ мм теоретический угол наклона составит $1,5''$. Результаты испытаний показали, что максимальный угол наклона не превышает $2''$.

Конструкция газового подшипника, используемого для линейного перемещения зеркала Фурье – спектрометра, приведена на рис. 4.10б. Подшипник состоит из подвижного поплавка 1 и неподвижной части 2. На подвижном поплавке 1 установлено зеркало 3. Зазор между двумя частями подшипника около 10 мкм. В зазор из полости 4 через отверстия 5 проходит газ, который поступает в фильтр чистой очистки 6 по шлангу 7. Параллельность перемещения зеркала 3 в пределах $\pm 1''$ обеспечивается на ходе 1 см.

Глава 5. Фокусирующие механизмы оптических приборов

5.1. Общие сведения

Обобщенная структурная схема оптико – информационных приборов представлена на рис.5.1. Схема включает четыре составные части: объект, ОП, оператора и внешнюю среду. Функции оператора могут выполнять кроме человека и другие выходные устройства.

В подобных приборах существенны информационные характеристики, определяемые с помощью пространственных взаимодействий СЧ. Просмотр или сканирование объектов в проходящем или отраженном свете может производиться по всему объекту, в его сечениях или в отдельных точках, что приводит к необходимости перемещения, определения координат, корректировки волновой поверхности по осям X , Y , Z .

Следует отметить главную роль координаты Z , совпадающей с оптической осью, вдоль которой распространяются лучи, или параллельной ей. Фокусирующие перемещения по этой координате всегда влияют на получаемую информацию, в то время как роль координат X и Y может быть мала. Поэтому во многих случаях задача сопряжения пространства предметов и пространства изображений сводится к фокусирующему перемещению по оси Z . Сопряжение плоскостей вдоль оси Z выполняется при эксплуатационной или технологической юстировке ОП, например, шкал в поле зрения, при сопряжении промежуточных плоскостей в приборах и т.п. Аналогичную задачу решает адаптивная оптика, с помощью которой корректируют оптический сигнал, деформируя волновую поверхность вдоль оси Z .

Таким образом, для геометрического сопряжения пространства предметов и их изображения, а также обеспечения качества оптического сигнала необходимо иметь возможность управления координатой Z системы “объект – ОП”. Назовем такой процесс управления – фокусированием, а устройства, используемые для его выполнения, фокусирующими устройствами или механизмами (фокусаторами – ФУ, ФМ).

Рассмотрим, с помощью каких СЧ системы производят фокусирование. На рис. 5.2а показана структурная схема функциональной подсистемы ОП, а на рис. 5.2б – ее оргграф, где ИИ (1) – источник излучения, О (2) – объект, ОС (3) – оптическая система, ПИ (4) – приемник излучения, ВУ (5) – выходное устройство. Сплошными линиями показан путь последовательного прохождения оптического сигнала, пунктирными линиями помечены возможные взаимосвязи, возникающие в процессе фокусирования. Они могут быть последовательными, параллельными и смешанными, обеспечивать прямую

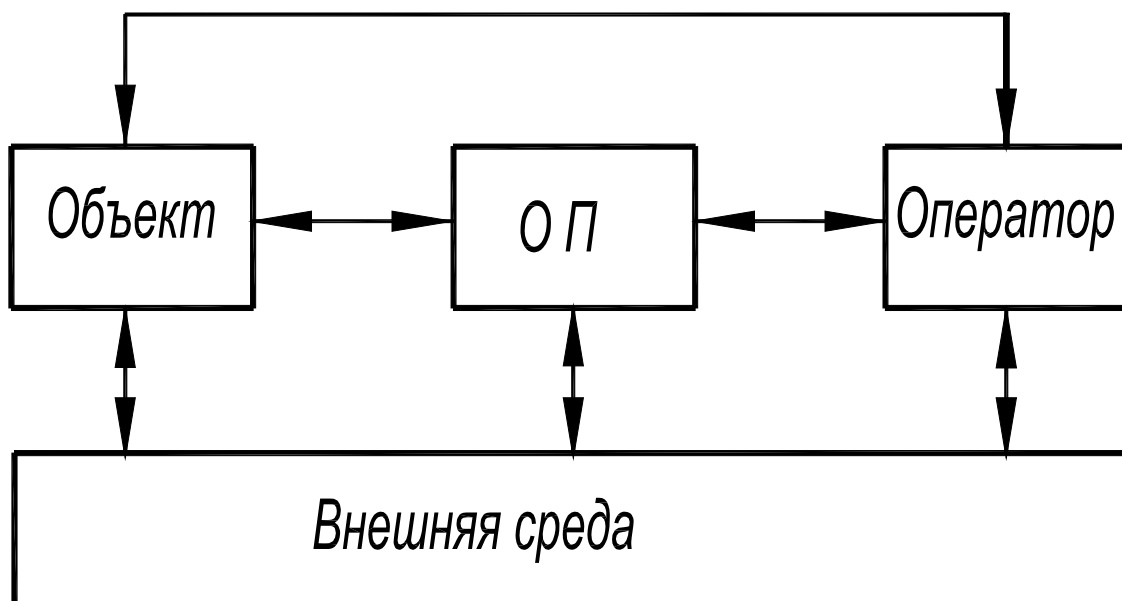
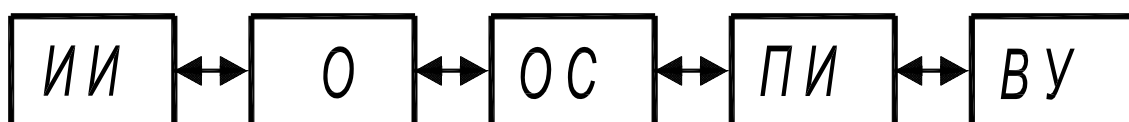


Рис. 5.1. Структурная схема оптических приборов

а)



б)

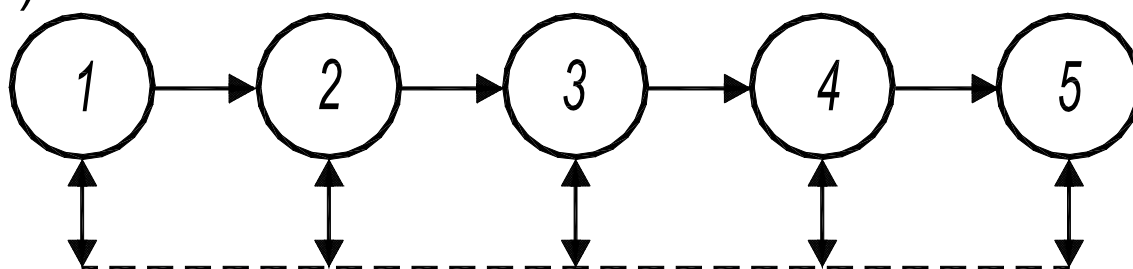


Рис. 5.2. Структурная схема функциональной подсистемы

и обратную связи, действовать на один или несколько СЧ схемы (или на какой-либо элемент СЧ ОП).

С учетом использования вариантов, отличающихся физическими принципами, общее число исполнений составит несколько тысяч.

Отметим еще одну особенность фокусирования. В соответствии с требованиями Максвелла геометрически совершенная ОС должна обеспечивать стигматическое изображение точки. Отсюда следует, что оптическая система тем лучше, чем меньше глубина сопрягаемых пространств предмета и изображения. Поэтому на конечных расстояниях невозможно получить в одной плоскости пространства изображений большую глубину пространства предметов. В то же время для отдельных приборов (фото-, кино-, телеаппаратуры, микроскопов, производственных роботов, проекционных приборов) увеличение рассматриваемой глубины пространства предметов весьма актуально. Это соответствует обычным условиям зрения человека, и для многих научно – технических задач представление обо всем объеме исследуемых объектов значительно сокращает время анализа, повышает точность измерения и т.д. Одно из решений этой проблемы заключается в том, что в плоскость изображения последовательно, с большой частотой проектируют отдельные слои пространства предметов, размер которых вдоль оптической оси соответствует глубине резкости ОС.

Фокусировочные устройства используют при просмотре пространства предметов, наводке на резкое изображение, при измерениях вдоль оси Z, юстировке ОП, перемещении адаптивных элементов ОС, увеличении глубины резкости и т.д. Они входят неотъемлемой частью в конструкцию большинства ОП и снабжаются ручным или автоматизированным управлением.

5.2. Процесс фокусирования

Из схемы на рис. 5.2а видно, что при фокусировании участвуют следующие составные части ОП: объект О, оптическая система ОС, приемник излучения ПИ, выходное устройство ВУ. В отдельных случаях необходимо учитывать особенности источника излучения ИИ, а также внешней среды ВС. Связи между этими составными частями выполняет фокусировочное устройство ФУ (ФМ, фокусатор, корректор). Таким образом, мы имеем дело с системой S, включающей

$$S = \{ O, ОС, ПИ, ВУ, ИИ, ВС, ФУ, \tau \}, \quad (5.1)$$

где τ – оператор взаимодействия и взаимосвязи СЧ.

Рассмотрим основные случаи применения фокусирования в ОП.

5.2.1. Визуальное наблюдение и визуальный контроль резкого изображения

В этом случае система S имеет вид

$$S1 = \{O, OC, ОПЕ, ФУ, \tau1\}, \quad (5.2)$$

где оператор $\tau1$ определяет взаимодействия и взаимосвязи при визуальном наблюдении, а функцию ПИ и ВУ объединены в лице оператора – наблюдателя ОП. Внешняя среда также учитывается в отдельных типах приборов. Визуальное наблюдение широко применяется в микроскопах, зрительных трубах и их разновидностях, проекционных приборах, в юстировочных механизмах и узлах ОП и т.п.

5.2.2. Автоматизированное фокусирование на резкое изображение

Под автоматизированным фокусированием понимается использование поступающей от объекта информации для автоматического управления установки системы в положение резкого изображения объекта. В этом случае система S2 включает в себя

$$S2 = \{O, OC, ПИ, ВУ, ФУ, \tau2\}, \quad (5.3)$$

где оператор $\tau2$ характеризует особенности взаимодействия СЧ в системе автоматизированного фокусирования (САФ).

Этот вариант широко применяется в фотоаппаратах, теле и видео камерах, различных автоматизированных контрольно – измерительных устройствах, оптических приборах для космоса и т.п.

5.2.3. Автоматизированное исправление искажений волнового фронта оптического сигнала по оси Z

Искажения волнового фронта могут возникать как во внешней среде, через которую проходит световой пучок, так и вследствие дефектов оптической системы. При таких условиях систему характеризуют зависимостью S1. Устранение искажений волнового фронта во внешней среде актуально для телескопических приборов, светодальномеров и других ОП, в которых световой луч подвергается воздействию атмосферных флуктуаций, а также для лазеров, главным образом, больших мощностей. Деформации или микроперемещения оптических элементов используют и для улучшения качества изображения оптических систем, устранения разъюстировки ОП (особенно в космосе) и т.п.

5.2.4. Перемещение СЧ ОП вдоль оси Z

В отдельных ОП (интерферометрах, интерференционных спектрометрах и других) для модуляции светового пучка требуются перемещения оптических элементов вдоль оптической оси. Такие перемещения аналогичны фокусирующим движениям, перечисленным

ранее.

5.2.5. Системы машинного видения

В последние годы приходится решать много задач, связанных с управлением и наведением автономных аппаратов, например, промышленных роботов, автоматизированных транспортных средств и т.п., с распознаванием изображений объектов и слежением за ними, автоматизированным контролем качества продукции и т.д. Системы, осуществляющие автоматизированную обработку и анализ визуальной информации при выполнении подобных задач получили название систем машинного видения (СМВ). Основные функции, реализуемые СМВ, включают обнаружение, идентификацию, а также определение ориентации, координат и других параметров объектов.

Следует отметить, что в СМВ автоматический анализ плоских двухмерных изображений осуществляется сейчас достаточно успешно. Однако анализ трехмерных объектов еще находится в начальной стадии.

5.3. Визуальное фокусирование

При визуальном фокусировании используют два режима получения информации об объекте: просмотр вдоль оптической оси Z пространства предметов и позиционирование (установка) отдельных плоскостей (поверхностей) пространства предметов в положении резкого изображения.

Режим просмотра применяют для последовательного извлечения информации из всего объема пространства предметов, например, при просмотре толстых препаратов на микроскопах, при теле-, видеосъемке и т.п. В поле зрения в процессе фокусирования появляются изображения новых объектов или их частей, расположенные случайно или упорядоченно. При этом глаз наблюдателя производит скачкообразные поисковые движения, и если обнаруживает какое-либо событие в поле зрения, то фиксируется на нем. Длительность фиксационных пауз зависит от особенностей изучаемого объекта, степени знакомства с ним наблюдателя и скорости его реакции, условий наблюдения для зрительного канала, возможностей оптического прибора и других причин. Для широкого круга задач по обнаружению объекта длительность пауз колеблется в пределах $0,05 \dots 2$ с.

Режим позиционирования необходим при линейных и угловых измерениях, фотографировании, наводке ОП на какую-либо метку, юстировке ОП и в других аналогичных случаях. При таком фокусировании в поле зрения вначале появляется размытый образ предмета, который затем устанавливают на резкое изображение.

Таким образом, при просмотре пространства предметов и при позиционировании на определенную плоскость, наблюдатель перемещает ОС или объект вдоль оси Z со скоростью V_z . Величина скорости должна соответствовать времени t_p простой реакции наблюдателя на образ искомого объекта, который располагается в элементарной зоне резкого

изображения, равной глубине резкого изображения прибора T в пространстве предметов или пространстве изображения. Поэтому скорость фокусирования

$$V_z = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{T}{t_p}, \quad (5.4)$$

где ΔS – элементарный отрезок, равный глубине резкого изображения или точности наводки, проходимый за элементарный промежуток времени Δt , соответствующий времени t_p простой реакции приемника информации.

Формула (5.4) характеризует также и чувствительность механизма, поскольку элементарный отрезок ΔS соответствует минимальному времени. При визуальном фокусировании время простой реакции определяется временем восприятия сигнала.

Используя элементарную теорию информации, определим время реакции. При равновероятном появлении сигналов в поле зрения количество перерабатываемой человеком информации H достигает максимальной величины и составляет

$$H = \log_2 N \quad (\text{бит}), \quad (5.5)$$

где N – число изучаемых объектов (алфавит).

Практика работы на ОП показывает, что при просмотре пространства предметов или при наводке на резкое изображение, имея в виду, что работа всегда производится с определенной целью, число изучаемых событий обычно не превышает 100 единиц. Это соответствует количеству информации H приблизительно 7 бит. Отметим, что даже значительное изменение числа N существенно не изменяет величину H . Так при $N = 1000$ $H \approx 10$.

Пропускная способность C зрительного анализатора определяется отношением

$$C = \frac{KH}{t_p} \quad (\text{бит/с}), \quad (5.6)$$

где K – число правильно опознанных событий за время t_p .

Максимальное число одновременно воспринимаемых предметов за краткий промежуток времени составляет не более 7 ± 2 . Пропускная способность зрительного канала $C = 30 \dots 50$ бит/с. С учетом формул (5.5) и

(5.6) скорость фокусирования

$$V_z = \frac{TC}{K \times \log 2N} . \quad (5.7)$$

В формулу входят все составляющие системы “Оператор – ОП – объект”, а именно:

Т – глубина резкого изображения характеризует ОП и оператора;

С и К – пропускная способность и число правильно опознанных событий – характеризуют оператора или иной приемник излучения;

Н – число изучаемых событий, связано со сложностью пространства предметов.

Значения отдельных составляющих имеют достаточно широкий разброс, и при проектировании ФУ целесообразно определить максимальное и минимальное значения V_z , затем, исходя из условий неблагоприятного сочетания факторов, принять соответствующее решение, желательно с запасом в два – три раза.

В отдельных случаях желательно увеличивать скорость фокусирования за счет увеличения глубины резкого изображения и пропускной способности приемника информации, а также уменьшения времени реакции приёмника информации.

В ОП с ручным управлением поступательное перемещение Δl вдоль оптической оси фокусируемого элемента выполняется часто с помощью рукояток ФМ, имеющих вращательное движение. Такой ФМ должен обеспечивать на выходе скорость V_z , определяемую формулой (5.7), а на входе скорость должна соответствовать минимальной скорости пальцев оператора V_o , которая по данным инженерной психологии составляет 0,1 мм/с. Передаточное отношение i ФМ равно отношению скоростей, т.е.

$$i = \frac{V_o}{V_z} = \frac{0.1}{V_z} . \quad (5.8)$$

При использовании винтовой, зубчатой, фрикционной и других подобных передач связь между поступательным перемещением Δl и вращением на один оборот рукоятки диаметром D определяется зависимостью

$$\Delta l i = \pi D . \quad (5.9)$$

Отсюда с учетом формулы (5.8)

$$\Delta l = \frac{\pi D}{i} = 10\pi D V_z. \quad (5.10)$$

Конструктор, задаваясь одним из параметров Δl или D , разрабатывает кинематическую схему ФМ.

При позиционировании (установочном перемещении) в качестве критериев можно принять точность наводки и количество наводок. В наилучшем случае количество наводок не должно превышать 1, т.е. оператор должен с первого раза осуществлять необходимую установку объекта на резкое изображение.

В реальных ФМ вследствие неоптимальной скорости движения, при неравномерном перемещении фокусируемых элементов, малой жесткости конструкции и т.п. имеют место нарушения оптимального фокусирования и увеличение числа наводок.

При больших изменениях пределов апертуры и фокусных расстояний (в 30 – 50 раз), что имеет место в микроскопах, фото-, киноаппаратуре и т.п., необходимая скорость фокусирования также должна меняться в больших пределах. В микроскопах, например, в конструкции ручных ФМ предусматривают два режима наводки: тонкую и грубую. При автоматизированной фокусировке для каждого объектива следует предусмотреть свой режим наводки, скорость которого определяется формулами (5.4) и (5.7).

Отметим, что в начале процесса фокусирования оператором часто не наблюдается резкое изображение искомой плоскости объекта, а иногда отсутствует даже намек на наличие изображения. Особенно это характерно для микроскопов, имеющих малую глубину резкого изображения. Величина зоны нерезкого изображения зависит от aberrаций ОС, контраста объекта, освещенности и т.д., и примерно в 10 – 20 раз превышает глубину резкого изображения.

Для проектирования ФУ необходимо знать глубину резкости разрабатываемого ОП.

Глубина резкости изображения T' у фотоаппаратов, отдельных объективов и т.п. определяется зависимостью

$$T' = \pm \frac{d\rho \times f'}{D}, \quad (5.11)$$

где $d\rho$ – диаметр кружка рассеяния, определяемый разрешающей способностью приемника информации,

f' – фокусное расстояние объектива,

D – диаметр входного зрачка.

Величина кружка рассеяния при визуальной наводке определяется

разрешающей способностью глаза γ из формулы

$$dp = 250 \gamma. \quad (5.12)$$

Обычно γ находится в пределах от 1 до 4'.

Для других приемников излучения кружок рассеяния определяется частотно – контрастной характеристикой объектива, разрешающей способностью фотослоя, ПЗС приемника, телевизионной трубки и т.д.

Глубину резкости фотообъектива в пространстве предметов T можно определить из приближенной формулы

$$T = \pm \frac{dpa^2}{f'D}, \quad (5.13)$$

где a – расстояние от главной плоскости объектива до объекта.

Глубина резкого изображения микроскопа складывается из волновой и аккомодационной глубин. Волновая глубина T_v равна

$$T_v = \frac{n\lambda}{2A^2}, \quad (5.14)$$

где n – показатель преломления среды,
 λ – длина волны света,
 A – апертура микрообъектива.

Аккомодационная глубина T_a определяется по формуле

$$T_a = \frac{250n}{V_m^2}, \quad (5.15)$$

где V_m – увеличение микроскопа.

5.4. Типовые схемы и конструкции фокусировочных механизмов с визуальным наведением

Более подробная структурная схема ОП с визуальным фокусированием приведена на рис.5.3. Схема содержит три основных СЧ: объект (О), оптический прибор (ОП) с оптической системой (ОС) и фокусировочным механизмом (ФМ) и оператора. После переработки оптического сигнала оператор воздействует на органы управления и исполнительный механизм, которые вместе и образуют ФМ. Далее ФМ действует на объект или оптическую систему.

Следует отметить, что в схеме визуального фокусирования используется обратная связь, что значительно повышает точность фокусирования.

Рассмотрим ФМ для визуального фокусирования, начиная с наиболее простых.

5.4.1. Фокусировочные механизмы юстировочных устройств, объективов и окуляров

При юстировке производят сопряжение промежуточных плоскостей изображений, установку измерительных или ограничительных шкал и меток в фокальных плоскостях объективов и окуляров, размещают диафрагмы поля зрения или апертурные диафрагмы и другие оптические детали в необходимое положение и т.п. Такая юстировка выполняется с помощью фокусировочных перемещений вдоль оптической оси, которые имеют характер одноразового перемещения, выполняемого при изготовлении ОП, или выполняются постоянно в процессе эксплуатации прибора.

Из формул (5.4) и (5.11) следует, что если отношение f/D лежит в пределах от 0,5 до 20, а $tr = (0,1...0,3)$ с, то скорость фокусирования отдельных линз, окуляров, объективов, сеток и т.д. находится в пределах 0,15...20 мм/с. Эти скорости фокусировочного перемещения соответствуют возможностям оператора и при производственной юстировке выполняются простыми техническими средствами. Для эксплуатационных юстировочных перемещений в целях создания максимального комфорта при фокусировании со скоростями (0,1...0,5) мм/с вводят обычно дополнительные устройства (например, винтовые или зубчато-реечные у объективов и окуляров).

Конструкции юстировочных узлов, имеющих одноразовое производственное фокусировочное движение, приведены на рис.5.4. На рис. 5.4а показана конструкция установки сетки. Оправа сетки может перемещаться вдоль оптической оси и закрепляется винтом. Варианты фокусирования линз показаны на рис. 5.4 б, в, г, д. Для фокусировки может быть использована резьба на оправе объектива (рис. 5.4б). Такая конструкция при перемещении линзы вдоль оси приводит к изменению ее

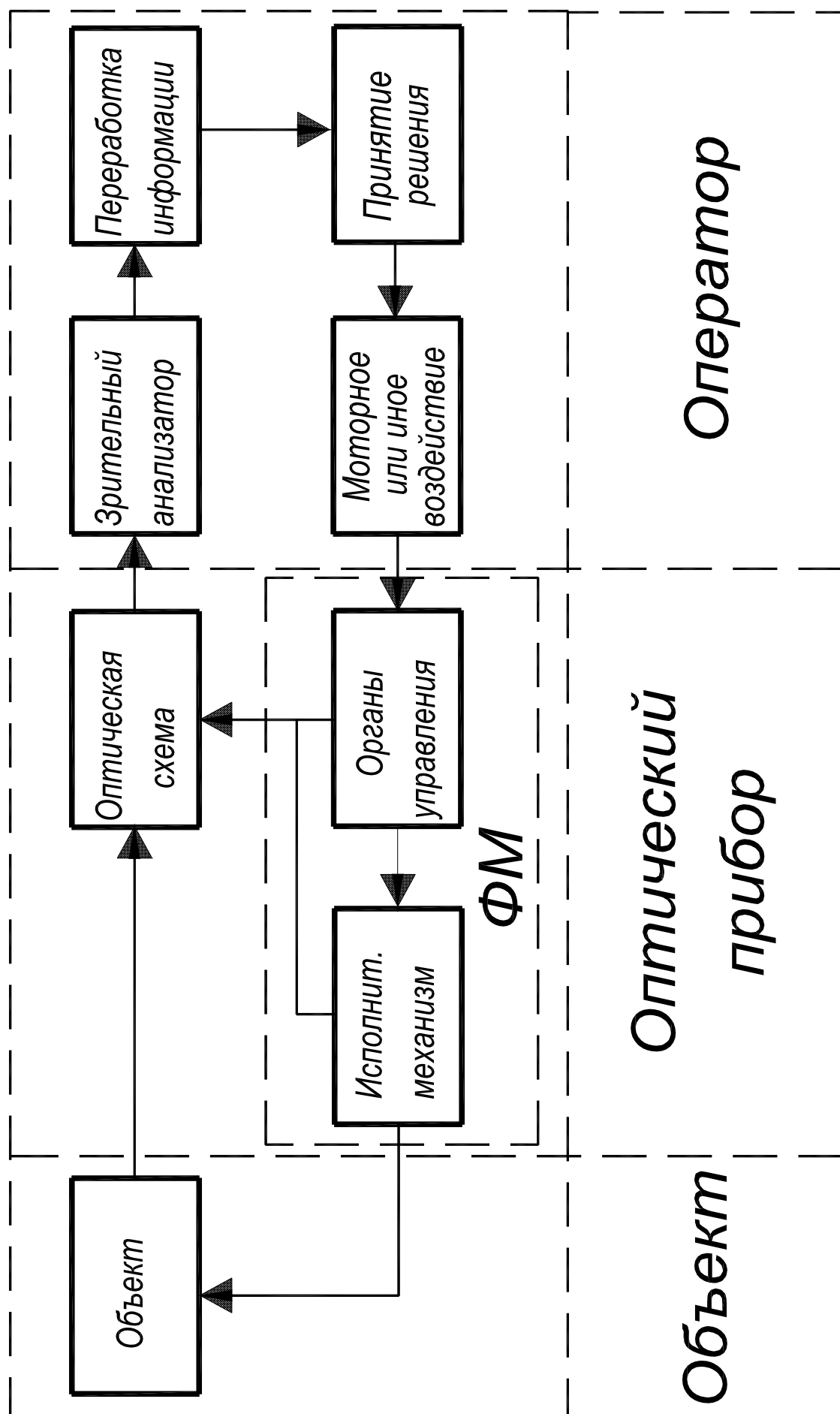


Рис. 5.3. Структурная схема визуального фокусирования

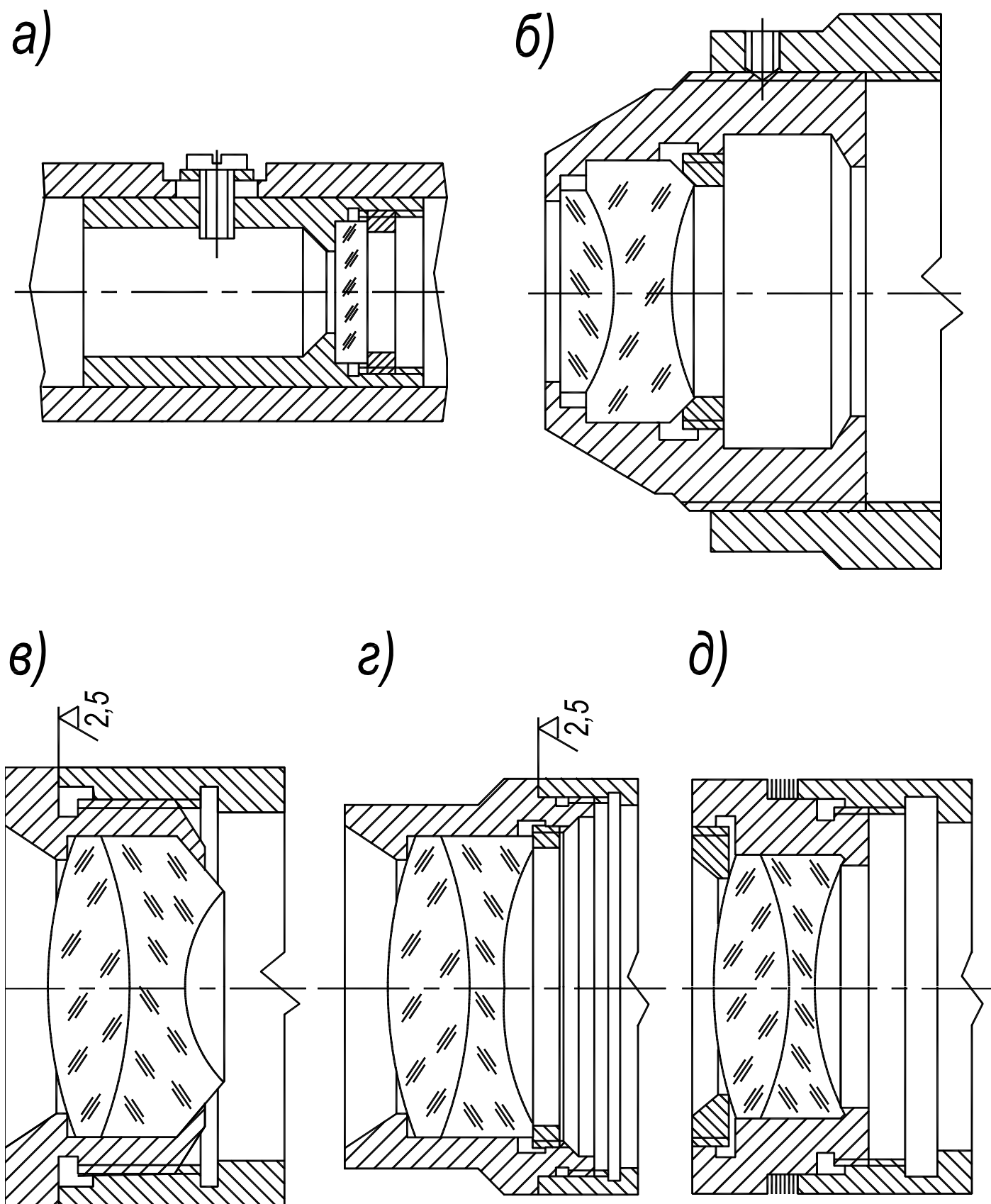


Рис. 5.4. Производственные фокусирующие узлы

центрировки вследствие биения оправы и линзы и наличия зазоров в резьбе. Используют также конструкции с подрезкой оправы линзы (рис.5.4в), применением промежуточного кольца или набора прокладок (рис.5.4д). Для подрезки оправы или промежуточного кольца в них должны быть предусмотрены припуски в 0,2...0,5 мм дополнительно к минимальным размерам деталей. Варианты, представленные на рис. 5.4г, д, обеспечивают более точную центровку линз.

Конструкции ФМ, в которых используются эксплуатационные юстировочные перемещения, даны на рис. 5.5. В таких механизмах применяются винтовые, зубчато-реечные, кулачковые, эксцентриковые и другие механизмы.

На рис. 5.5а приведена конструкция окуляра микроскопа. Глазная линза 2 при вращении перемещается по резьбе и фокусируется на сетку 1. На рис. 5.5б показан окуляр с внутренней фокусировкой. Между корпусом 1 и втулкой 4 вращается гайка 2, которая через три резьбовых выступа, расположенных на оправе 3 под углом 120° , перемещает оправу 3 с линзами. Механизм внутренней фокусировки, используемый в телеобъективе зрительной трубы, изображен на рис. 5.5в. В корпусе 1 находятся компоненты телеобъектива 2 и 3. Перемещение отрицательной линзы 3 производится при вращении рукоятки 4 с помощью установленного на оси 5 штифта 6, который входит в паз оправы линзы 3.

Выбор конструкции ФМ для производственных механизмов определяется её простотой, технологичностью и требуемой точностью установки оптических элементов.

Для эксплуатационных ФМ важную роль имеют требования, связанные с управлением.

5.4.2. Фокусировочные механизмы световых микроскопов

Световые микроскопы относятся к ОП ближнего действия, использующим большие увеличения и апертуру. На ФМ микроскопов влияют следующие факторы:

1. Большие диапазоны изменения увеличений и апертуры. Увеличение может изменяться от $5 \dots 10^x$ до $2000 \dots 3000^x$, т.е. до 600 раз, а апертура от 0,01...0,03 до 1,4, т.е. до 140 раз. Это приводит к изменению глубины резкости в пространстве предметов до 2000 раз. Поэтому ФМ микроскопов должны иметь широкие адаптивные возможности для просмотра объекта по оси Z и позиционирования (установки) необходимой плоскости предмета на резкое изображение.

2. Точность измерений. При использовании микроскопов и их специализированных модификаций для линейных, угловых или других измерений ФМ иногда используются для непосредственных измерений вдоль оптической оси. В этом случае необходимо учитывать

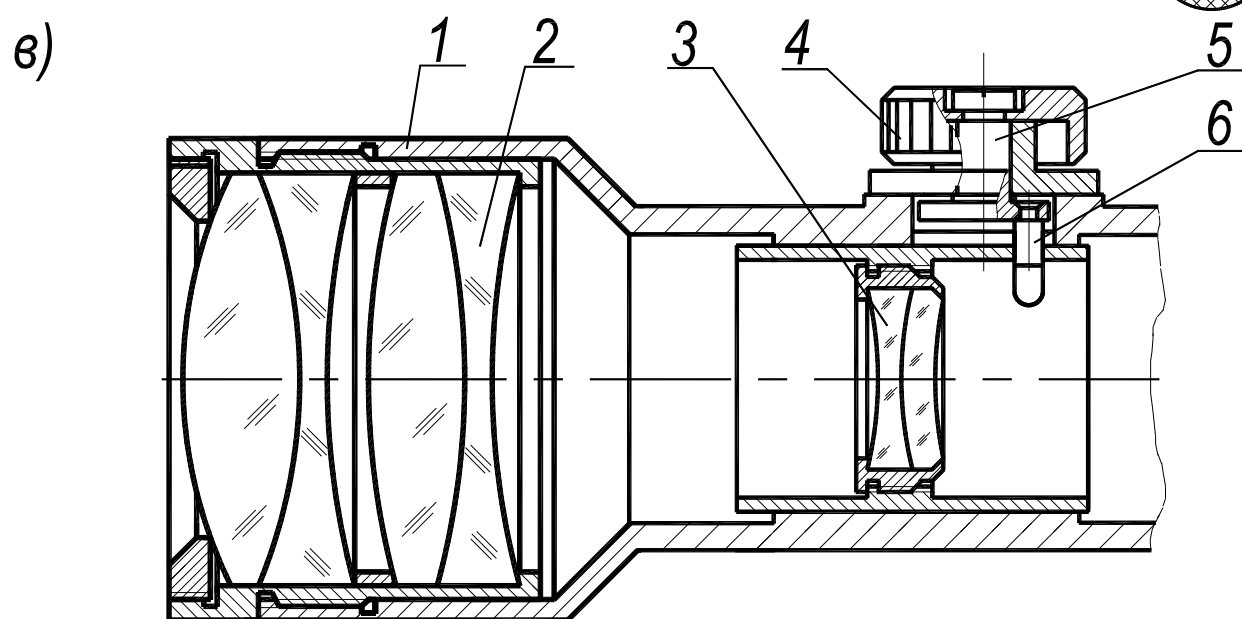
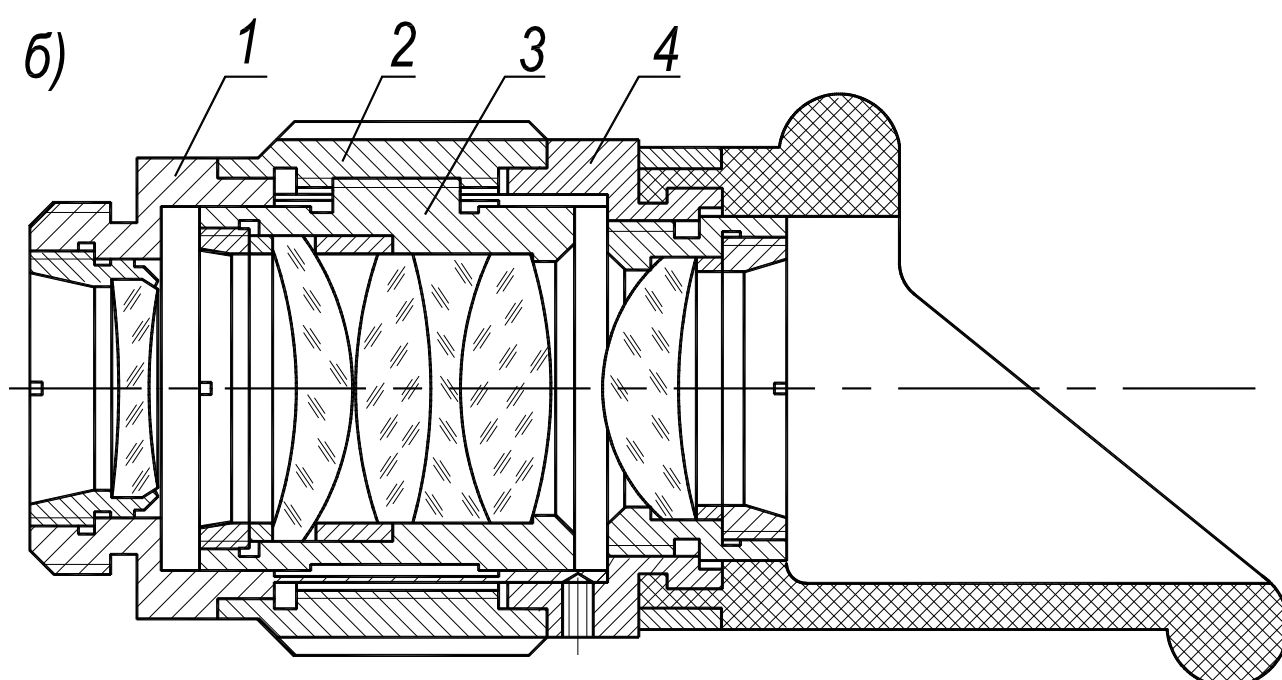
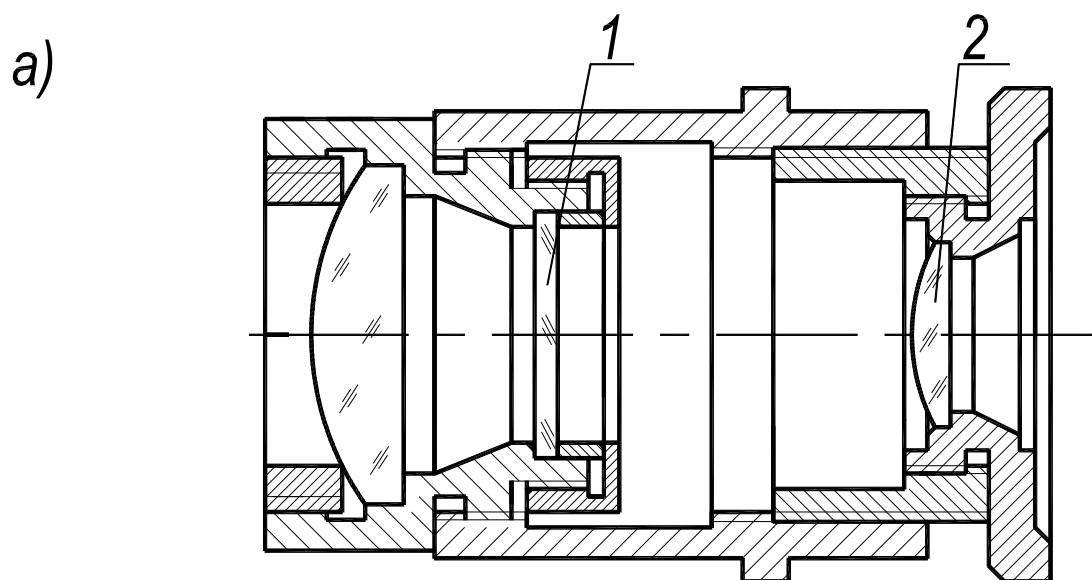


Рис. 5.5. Эксплуатационные фокусирующие узлы

точностные характеристики ФМ. Точность наводки ΔZ вдоль оптической оси тесно связана с глубиной резкого изображения и определяется соотношением

$$\Delta Z = \frac{an}{A^2} . \quad (5.16)$$

Значение коэффициента “а” равно 0,2.

Поэтому при разработке микроскопов, используемых для измерений по оси Z, скорость фокусирования V_z определяется зависимостью

$$V_z = \frac{\Delta Z}{t_p} . \quad (5.17)$$

Исследования показали, что увеличение микрообъективов на ошибку наводки не влияет.

3. Точность позиционирования. Перемещение вдоль оптической оси непосредственно влияет на дифракционное качество изображения. Неточная установка предметной плоскости приводит к размытию краев изображения, искажению линейных или угловых размеров и ошибкам при измерении фотометрических характеристик гетерогенных объектов, нерезкости фотографий и другим дефектам. Для указанных видов работы точность позиционирования должна находиться в пределах половины глубины резкого изображения объектива с учетом чувствительности приемника излучения. При счете точечных объектов и измерении их координат, фотометрировании гомогенных объектов допустимые смещения могут составлять 2...3 глубины резкого изображения, так как в этих случаях размытие изображения происходит симметрично контуру объекта.

4. Стабильность конструкции ФМ в пространстве. Поскольку фокусирование на микроскопе производится обычно перемещением объекта или объектива, то их относительные смещения по трем координатам должны быть минимальны. Наличие упругих или остаточных смещений сфокусированного микроскопа нарушает точность измерений, качество фотоснимков, снижает виброустойчивость и вызывает другие дефекты у приборов. Поэтому обеспечение необходимой стабильности и жёсткости конструкции ФМ – необходимое требование при разработке. Виброустойчивость ФМ тесно связана с жесткостью, поскольку частота собственных колебаний ω_0 механизма зависит от его жесткости.

5. Стабильность конструкции ФМ во времени. В случаях, когда на микроскопах производятся длительные исследования, например,

фотографирование, спектрофотометрирование и т.п., конструкция ФМ должна обеспечивать стабильное положение системы объектов вдоль оптической оси. Скорость смещения $V_{см}$ не должна быть больше

$$V_{см} < \frac{T}{t_n} \quad (\text{мкм/ч}), \quad (5.18)$$

где t_n – время проведения исследования.

Обычно величина $V_{см}$ не должна превышать 2...3 мкм/ч. При этом следует обращать внимание и на возможные температурные деформации.

6. Параметры кинематических схем ФМ. При выборе кинематических схем, используемых при ручном фокусировании с помощью вращения рукояток, следует обеспечивать необходимое соотношение между перемещением Δl вдоль оси Z на один оборот рукоятки и диаметром рукоятки D . Из формул (5.7), (5.10), (5.14), (5.16) можно получить простую зависимость

$$\Delta l \approx 0,01D. \quad (5.19)$$

Этой формулой можно пользоваться при эскизном проектировании ФМ, задавая одну из величин Δl или D . При автоматизированном фокусировании скорость фокусирования для каждого объектива определяется формулой (5.4). При использовании ФМ для измерений вдоль оси Z следует выполнять расчёт схемы на точность.

7. Мертвый ход в механизме тонкой подачи при применении объективов с большой апертурой должен быть минимальным и не превышать 2...5 мкм. Для устранения мертвого хода обычно используют силовое замыкание механизма.

При разработке ФМ необходимо также учитывать тенденции их развития, которые направлены на повышение точности, удобства работы и стабильности механизмов, а также на снижение производственных затрат.

5.4.2.1. Кинематические схемы фокусируемых механизмов

Поскольку оптические параметры микроскопов (апертура и глубина резкости) и сложность объектов имеют большие пределы изменений, то для каждого объектива необходима своя скорость фокусирования. Такое условие выполняется обычно в приборах, имеющих автоматизированное перемещение вдоль оптической оси. В микроскопах с ручным управлением используют два механизма – тонкого и грубого перемещения. Механизм тонкого перемещения применяется с объективами средних и больших увеличений от 40 до 120^x . Механизм грубой подачи используется для

фокусирования со слабыми микрообъективами, для предварительной наводки на резкость сильных микрообъективов, а так же при смене объективов и препаратов разной толщины, для быстрого отвода столика или объектива. Конструктор при разработке кинематической схемы ФМ микроскопа, предусматривающей два режима работы, должен учитывать комплект микрообъективов.

Оптимальное передаточное отношение η между механизмами тонкой и грубой подачи определяется отношением скоростей, т.е.

$$\eta = V_T/V_G, \quad (5.20)$$

где V_T и V_G – соответственно скорости фокусирования при тонком и грубом перемещении, определяемые формулой (5.4).

Передаточное отношение механизмов тонкой и грубой подачи с учётом формул (5.10), (5.14), (5.20) примет вид

$$\eta = \frac{A_{\min}^2}{A_{\max}^2} = \frac{V_{ZTP}}{V_{ZGP}} = \frac{\Delta l_{TP}}{\Delta l_{GP}} = \frac{D_{GP}}{D_{TP}}, \quad (5.21)$$

где $A_{\max}$ и $A_{\min}$ – апертуры микрообъективов максимального и минимального увеличения.

Поскольку механизм грубой подачи используется обычно при фокусировании объективов с апертурой до 0,3, то оптимальное передаточное отношение находится в пределах 1:20...1:150.

Исследования ФМ показали, что ошибки наводки и количество наводок не зависят от передаточных отношений механизмов, на них не влияют различия кинематических схем и использование для фокусирования тонкой или грубой подачи. Полученные результаты объясняются наличием обратной связи между зрительным анализатором и моторным действием оператора (см. рис. 5.3). Они показывают, что при проектировании конструктор в первую очередь должен выполнять требования в отношении скорости просмотрового фокусировочного перемещения, оптимизации передаточного отношения и размера рукояток. Он должен также выбирать наиболее простую схему, с учетом ее эргономичности и технологичности, а также других требований, которые будут указаны далее.

Отсутствие требований, строго определяющих кинематику, приводит к использованию в ФМ большого числа различных кинематических схем, количество которых в промышленных микроскопах превышает несколько десятков.

Кинематические схемы можно классифицировать по следующим

признакам:

- тип привода (ручной, моторный, гидравлический, пьезоэлектрический и т.д.);
- характер соединения схем механизмов тонкой и грубой подачи –
- раздельные и единые (последние схемы содержат оба механизма);
- число направляющих – две раздельные направляющие соответственно для каждой подачи или одна направляющая для обоих движений;
- особенности ручного управления – количество рукояток, используемых для управления (по одной рукоятке для каждой подачи или одна, позволяющая управлять двумя движениями), при этом рукоятки могут быть соосными или раздельными, занимать в пространстве горизонтальное или вертикальное положение;
- тип кинематических звеньев и особенности кинематических схем (при ручном управлении применяют зубчатые, зубчато-рычажные, планетарные, волновые, рычажно-винтовые, червячно-винтовые и другие схемы, а для моторных приводов используют двигатели с непрерывным или дискретным (шаговым) вращением, которые соединяются с движителем направляющей через зубчатые или иные редукторы;
- тип движителя направляющей ФМ (шестерня с рейкой, рычаг, кулачок, винт-гайка, стержень, изготовленный из магнитострикционного материала, пьезоматериала или материала, расширяющегося при тепловом нагреве, и т.п).

Рассмотрим типовые схемы ФМ, которые нашли практическое применение в отечественных или зарубежных микроскопах.

На рис. 5.6 представлены раздельные механизмы тонкой подачи с ручным управлением и приведено время их изобретения или применения в микроскопах.

На этих рисунках направляющая тонкой подачи (выход механизма) обозначена цифрой 1, а рукоятка управления (вход) – цифрой 2. Зубчато-рычажный механизм Мейера показан на рис. 5.6а. Вращения входной рукоятки 2 через систему колес передается на зубчатый сектор 3, который одновременно выполняет роль рычага. Качание сектора штифтом 4 передается на направляющую 1.

Рычажно-винтовой механизм металлографического микроскопа показан на рис. 5.6б, а на рис. 5.6в – винтовой механизм, используемый в биологических микроскопах широкого пользования серии МИКМЕД – 1.

На рис. 5.6г изображен рычажно-кулачковый механизм дистанционного микротвердомера. Рычажно-винтовой механизм поляризационных и биологических микроскопов показан на рис. 5.6д. При вращении рукоятки 2 через рычаги 3, 4 и штифт 5 происходит поступательное перемещение направляющей 1. Механизм позволяет в широких пределах изменять скорость фокусирования благодаря независимому вращению рукояток 2 с разной скоростью или даже в разные стороны.

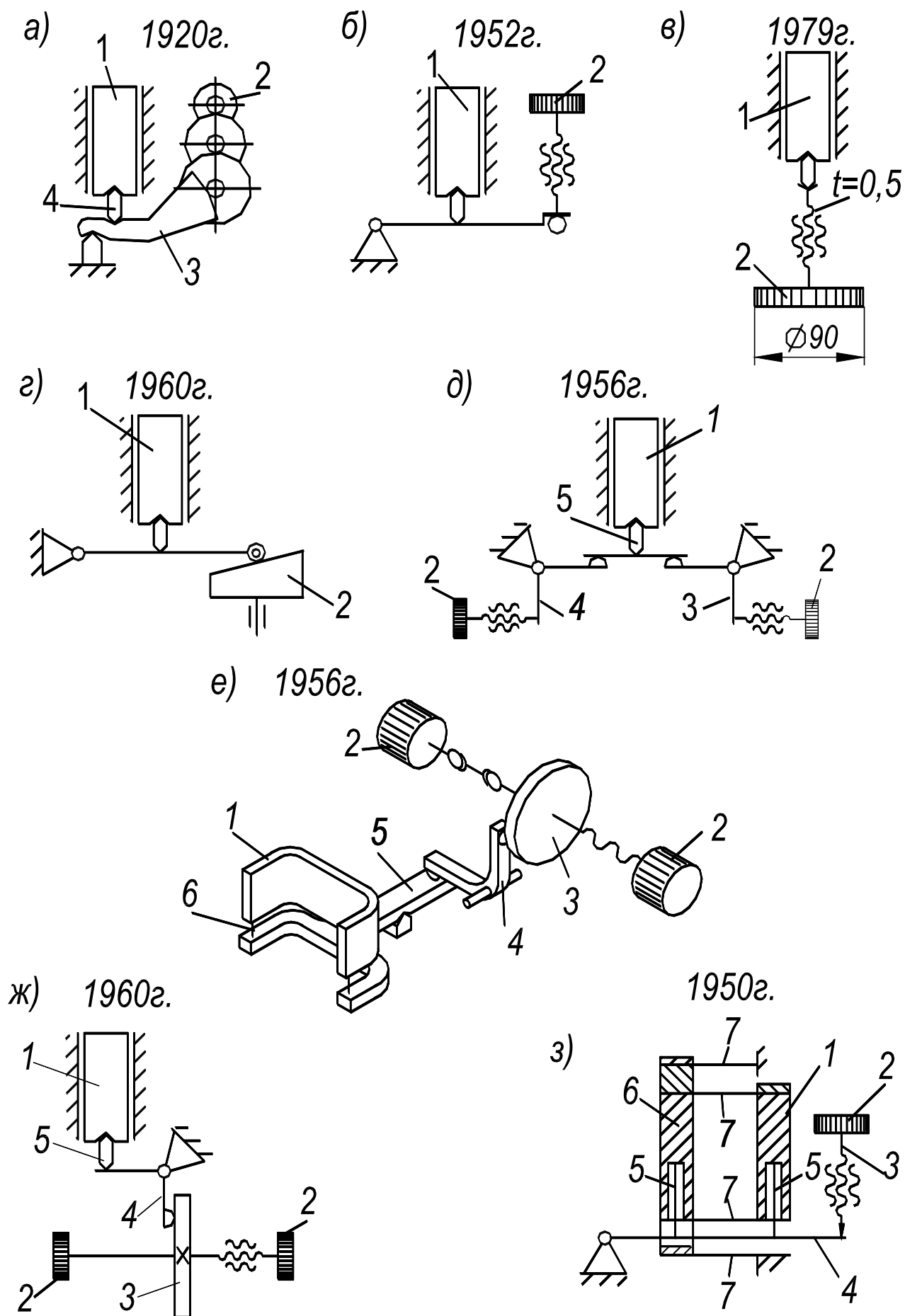


Рис. 5.6. Кинематические схемы механизмов тонкой подачи микроскопов

Рис. 5.6е демонстрирует измерительный механизм рычажно-винтового типа с горизонтальными рукоятками 2, характеризующийся высокой жесткостью конструкции направляющих. Перемещение фланца 3 через рычаги 4, 5 и штифты 6 передается на направляющую 1. Аналогичную схему привода имеет ФМ фирм Олимпус и Лейтц (рис. 5.6ж), в котором поступательное перемещение фланца 3 через рычаг 4 и штифт 5 передается направляющей 1. На рис. 5.6з показан ФМ с пружинными направляющими 7. Движение винта 3 через рычаг 4 и штифты 5 передается на кронштейны 6 и 1, в которых закреплены пружины 7.

Все рассмотренные механизмы имеют диапазон перемещения 1...4 мм, а перемещение на один оборот рукоятки 2 составляет 0,1...0,5 мм. В направляющих 1 (за исключением ФМ, показанного на рис. 5.6з) используется трение качения или скольжения. Механизмы имеют горизонтальное и вертикальное расположение рукояток.

На рис. 5.7 приведены схемы ФМ, в которых объединены механизмы тонкой и грубой подачи, что позволяет использовать одну направляющую или одну рукоятку для обоих движений. Имеются также варианты с соосным расположением рукояток. Эти улучшения направлены на повышение удобства работы или снижение затрат на их производство.

На рис. 5.7а представлена схема ФМ микроскопов единой системы ЕС МИКРАМ, используемая в биологических, люминесцентных, поляризационных, металлографических и др. микроскопах. При вращении рукоятки тонкой подачи 1 с помощью винта 2 перемещается гайка 3 и две оси 4, которые ввинчены в гайку. Оси 4 перемещают кольцо 5, в которое с двух сторон ввернуты оси 6. Эти оси передают поступательное движение на червяк 7, который вращает шестерни 8 и 9. С шестерни 9 движение передается на рейку 10, которая жестко связана с направляющей ФМ. Оси 4, 6 и кольцо 5 позволяют устранить избыточные связи в механизме.

Грубое перемещение осуществляется при вращении рукояток 11 и втулки 12 с пазом, в который входят оси 6. Далее через червяк 7, шестерни 8, 9 и рейку 10 движение передается на направляющую.

Взамен приведенного длинного описания кинематической схемы удобнее использовать графы. Построим вершинный ориентированный граф, в котором вершины соответствуют кинематическим звеньям, а ребра – связям между ними.

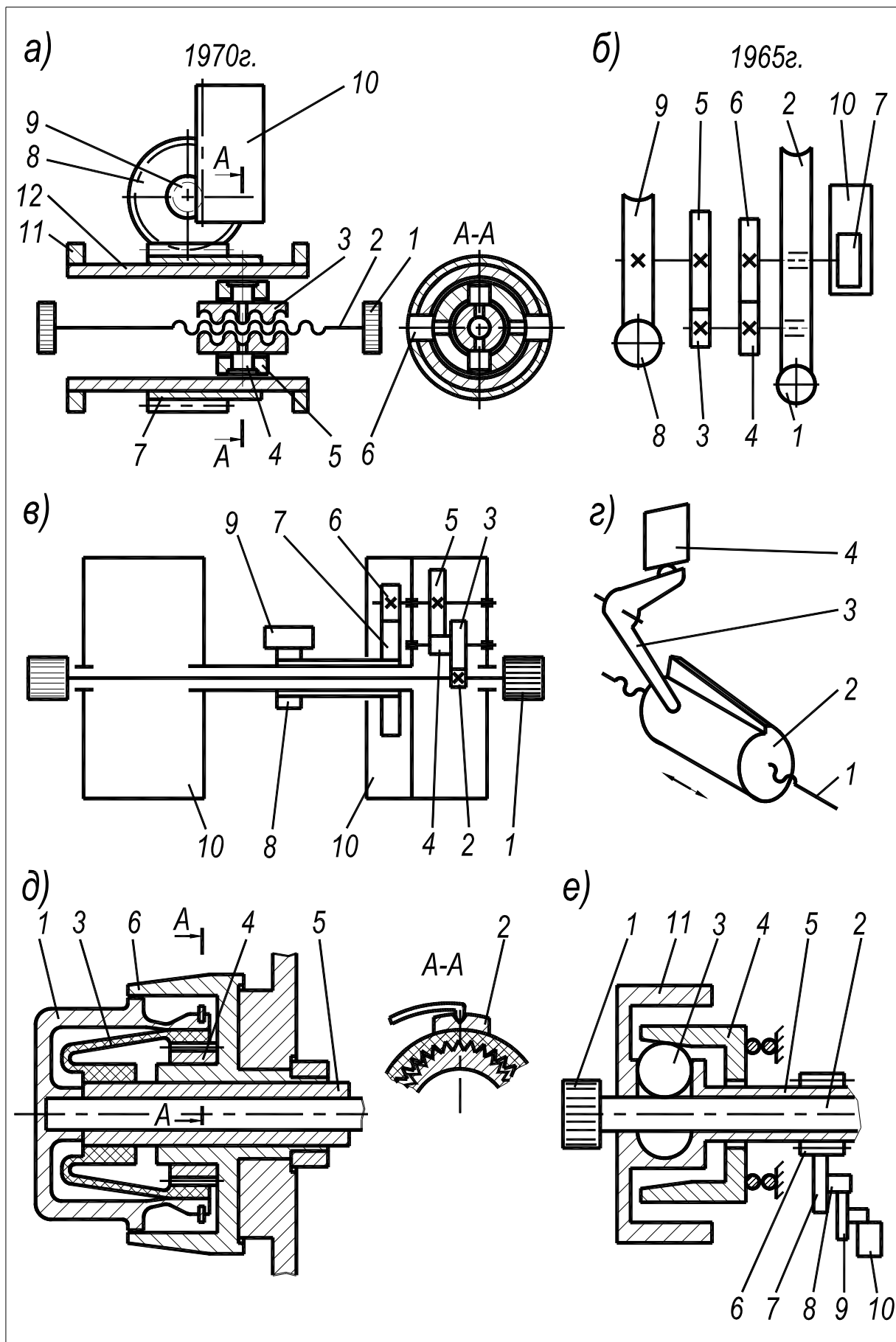


Рис. 5.7. Кинематические схемы механизмов с одной направляющей

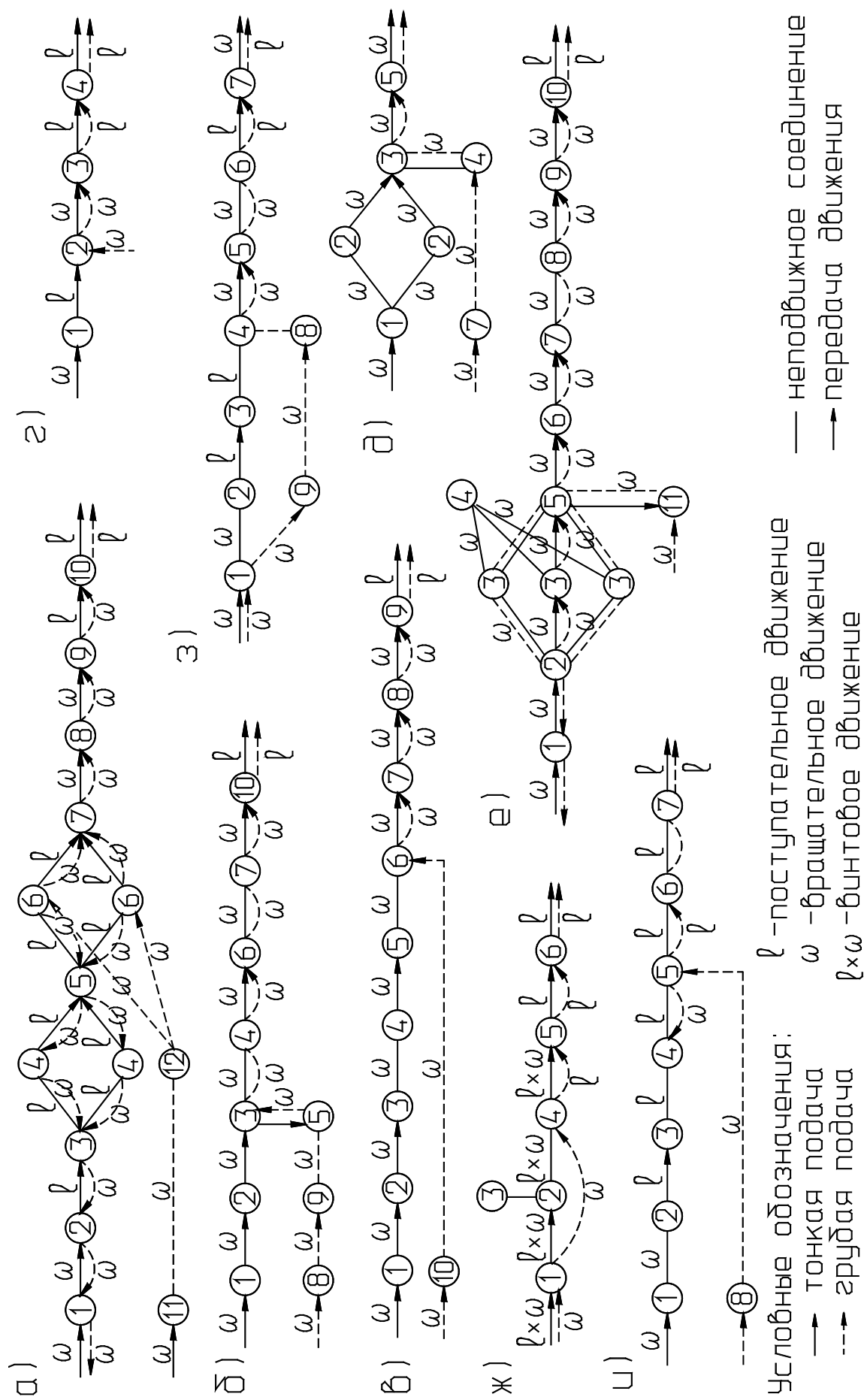


Рис. 5.8
Графы фокусирующих механизмов

Для механизма, представленного на рис. 5.7а, граф показан на рис.5.8а.

На рис. 5.7б изображена схема планетарного механизма фирмы Лейтц, а на рис. 5.8б – его граф. При вращении рукояток тонкой подачи червяка 1 поворачивается червячное колесо 2, на которое установлены планетарные колеса 3 и 4, имеющие разное число зубьев. Колесо 3 обкатывается по шестерне 5. Поэтому колесо 6 вращается с большим замедлением и через шестерню 7 перемещает рейку 10, установленную на направляющей. Грубая подача осуществляется через звенья 8, 9, 5, 3, 4, 6, 5, 7 и 10.

Схема ФМ фирмы К. Цейсс и Олимпус приведена на рис. 5.7в, а на рис. 5.8в – его граф. Входом тонкой подачи является рукоятка 1, а через звенья 2 – 9 осуществляется поступательное движение направляющей, жестко связанной с рейкой 9. Грубое движение осуществляется при повороте рукояток 10 через шестерни 6, 7, 8 и рейку 9.

В ФМ американской оптической компании используется механизм (рис. 5.7г и 5.8г), в котором применяется коноид. Входом тонкой подачи служит рукоятка, закрепленная на винте 1, а выходом – направляющая 4. При грубом перемещении рукояткой поворачивают коноид 2 и через рычаг 3 происходит быстрое движение направляющей. Схема привлекает своей простотой.

На рис. 5.7д и 5.8д показан ФМ с волновой передачей. При вращении рукоятки тонкой подачи 1 через гибкие выступы 2 движение передается на гибкое колесо 3, которое имеет на два зуба больше, чем шестерня 4. Замедленное вращение колеса 3 сообщается оси 5, в середине которой нарезано зубчатое колесо, сцепляющееся с рейкой, связанной с направляющей. Вращая рукоятку 6 грубой подачи, через шестерни 4 и колесо 3 движение передают на ось 5.

Фирма Оптон и фирмы Китая используют ФМ (рис .5.7е и 5.8е) с фрикционной передачей. Тонкая подача производится по кинематической цепи, состоящей из звеньев 1 – 10. При этом шарики 3, катаясь по конусу 4, поворачивают рукоятку 11 и шестерню 5. Грубая подача происходит при вращении рукоятки 11 и шестерни 5.

Схемы ФМ, имеющие одну направляющую и одну рукоятку для тонкого и грубого перемещения, показаны на рис. 5.9а, б. Фирма Рейхерт использовала механизм, показанный на рис. 5.9а. Граф изображен на рис. 5.8ж. При качании рукоятки 1 вокруг оси АВ поворачивается гайка 2 и перемещается по резьбе винта 3, поднимая или опуская шестерню 4. Шестерня сцеплена с рейкой 5, которая также поднимается или опускается вместе с направляющей 6. Таким образом выполняется тонкая подача. При грубой подаче рукоятку 1 не качают, а вращают, и с помощью шестерни 4 и рейки 5 перемещают направляющую 6.

На рис. 5.9б приведена кинематическая схема ФМ фирмы Лейтц, а на рис. 5.8з – его граф. При вращении рукоятки 1 с помощью кулачка 2 и

шарика 3 осуществляется тонкое поступательное перемещение червяка 4 вдоль оси рукояток. Затем через звенья 5 – 7 происходит перемещение направляющей. Грубое движение производится при соприкосновении штифтов 8 и 9 путем вращения червяка 4 и колеса 5.

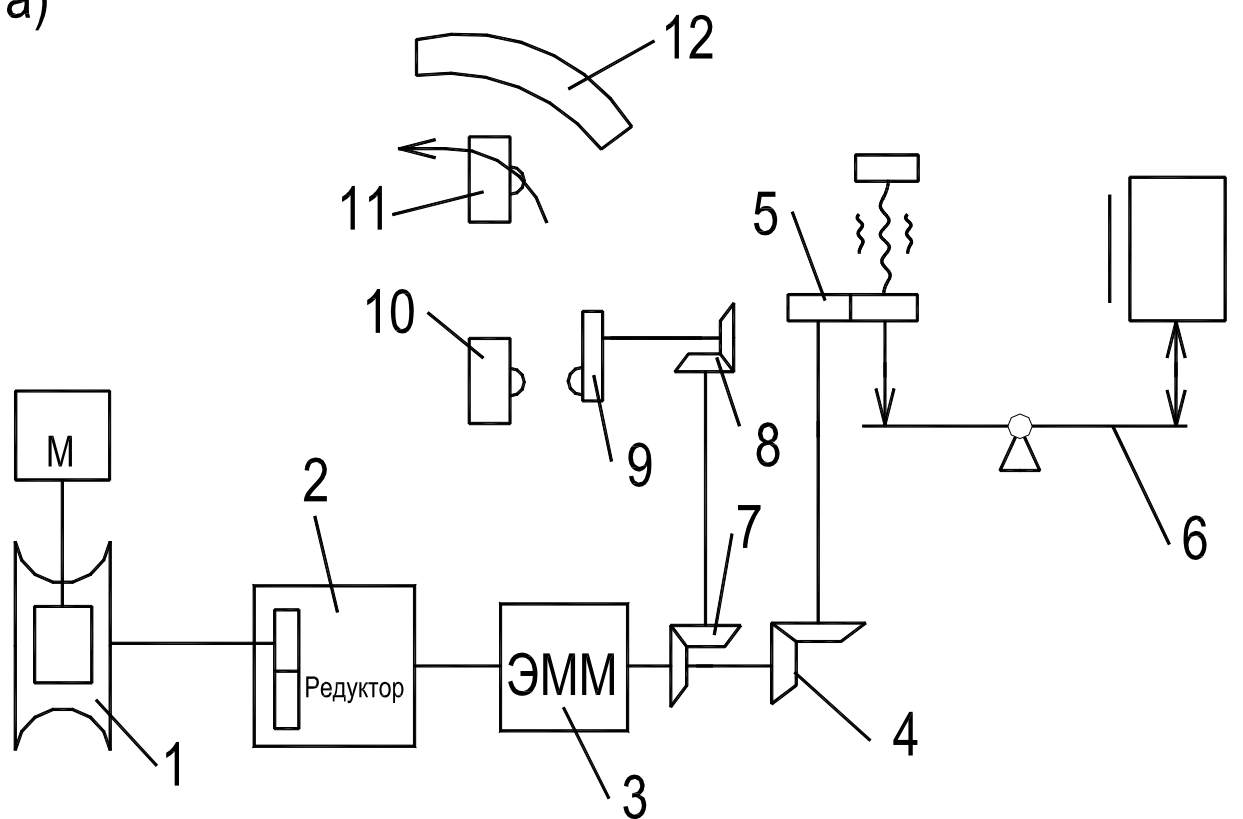
На рис. 5.9в и 5.8и представлена кинематическая схема ФМ с одной направляющей и двумя рукоятками управления и его граф. При вращении рукоятки тонкой подачи 1 винт 2 перемещает гайку 3 и рейку 4. Рейка 4 сцеплена с шестерней 5, которая через стойку 6 перемещает направляющую 7. При этом шестерня 5 связана со стойкой 6 через фрикционный тормоз, который обеспечивает при тонкой подаче неподвижность шестерни 5 в стойке 6. Поэтому направляющая 7 совместно с рейкой 4 перемещается вверх – вниз. При грубой подаче с помощью вращения рукоятки 8 преодолевают усилие во фрикционном тормозе и по рейке 4 перемещают с помощью шестерни 5 стойку 6 и направляющую 7.

Фокусировочные механизмы, показанные на рис. 5.7а, 5.7г, 5.9а и 5.9б, имеют ограниченные диапазоны тонкой подачи в пределах 0,1...5 мм. Схемы 5.7б, 5.7в, 5.7д, 5.7е и 5.9в обеспечивают использование тонкой подачи на всем диапазоне грубой подачи.

Кинематические схемы автоматизированных ФМ полуавтоматических микроскопов для просмотра фотоэмульсий и металлографического микроскопа приведены на рис. 5.10.

Просмотр фотоэмульсий толщиной до 250 мкм при поиске следов заряженных частиц является достаточно трудоемкой операцией, выполняемой на микроскопе при использовании объективов с увеличением $20 - 100^x$. Только при просмотре одного литра фотоэмульсии с объективом 20^x необходимо оценить информационное содержание около 200 млн полей. Поэтому в полуавтоматическом просмотровом микроскопе использовалась схема, показанная на рис. 5.10а и обеспечивающая получение скоростей фокусирования 6,6; 16,6; 33,8; 66,6 и 100 мкм/с. Каждая из этих скоростей также могла плавно уменьшаться в два раза при изменении числа оборотов мотора М. Вращение мотора М через червячную пару 1, редуктор 2, который позволяет устанавливать четыре указанных скорости, реверсивную электромагнитную муфту 3, зубчатые передачи 4 и 5 передается на рычажно-винтовой ФМ – 6. Зубчатые передачи 7 и 8 передают движение на вращающийся переключатель 9, который с помощью микропереключателей 10 и 11 производит изменение направления вращения шестерен 4 и 7 с помощью муфты 3. Верхний микропереключатель 11 может поворачиваться и позволяет регулировать диапазон фокусировочного перемещения через интервалы 6 мкм по шкале 12.

a)



6)

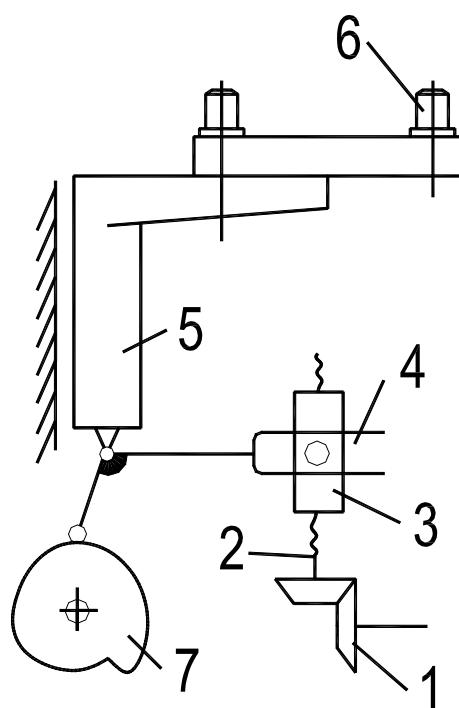


Рис. 5.10. Кинематические схемы автоматических фокусировочных механизмов

На рис. 5.10б дана схема ФМ металлографического дистанционного микроскопа. От мотора через шестерни 1, винт 2, гайку 3 движение передается на рычаг 4. Качание рычага перемещает направляющую 5, на которой установлен револьвер с объективами 6. Вращение кулачка 7 используется для опускания объективов 6 вниз при их переключении.

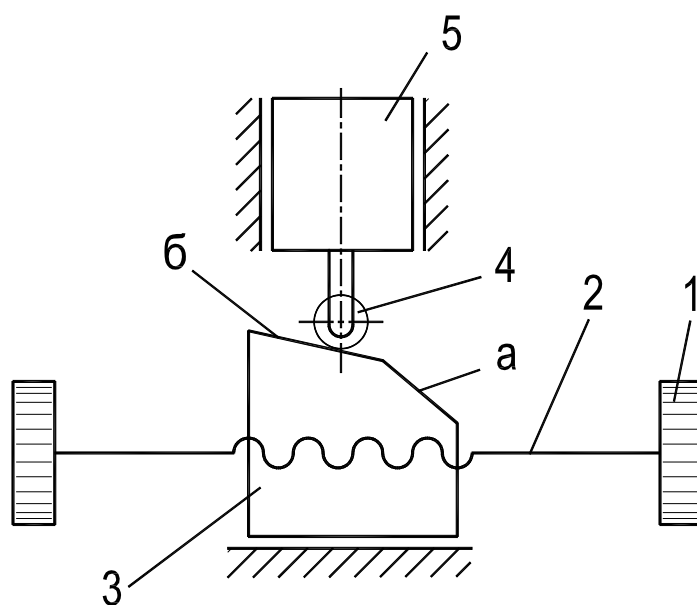
Кроме схем, основанных на механических принципах, используются и другие устройства, основанные на пьезоэффекте, магнитострикции, тепловом расширении, гидравлике, пневматике и т.д. В сканирующих микроскопах ближнего поля для необходимых наноперемещений используют пьезоэлектрические устройства, которые подробно описаны далее. Однако в микроскопах широкого пользования, составляющих основной объем производства, используются практически только механические ФМ ввиду их простоты и надежности.

В настоящее время имеются ФМ с одной направляющей, одной рукояткой управления и переменным передаточным отношением. Отличие этих механизмов от рассмотренных ранее состоит в том, что фокусирующее перемещение имеет две скорости – быстрое (грубое) перемещение на начальном этапе сближения объекта и объектива и замедленное (тонкое) – на заключительном этапе фокусирования. При этом оба сближения производятся с помощью одной рукоятки.

Схемы таких ФМ показаны на рис. 5.11. При вращении рукояток 1 (рис.5.11а) винтом 2 перемещается клин 3, который имеет два участка "а" и "б" разного наклона и через ролик 4 перемещает направляющую 5. При движении ролика 4 по участку "а" клина происходит быстрый подъем направляющей, а при контакте ролика с участком "б" скорость движения замедляется. Таким образом при простой кинематической схеме и минимальном количестве кинематических звеньев (4) обеспечивается быстрое и удобное фокусирование при стандартной высоте объективов.

На рис. 5.11б приведена схема механизма с цилиндрическим кулачком и механизмом смещения "0". При вращении рукоятки 1 кулачок 2 через шарикоподшипник 3, установленный на рычаге 4, перемещает направляющую 5. При этом рычаг 4, закрепленный на направляющей 5, вращается вокруг оси 6. Профиль кулачка содержит несколько участков. На участке I шарикоподшипник 3 находится в верхнем положении. Участок II используется для фокусирования сильных объективов с апертурой 0,65...1,3 и имеет минимальный угол наклона, участок III используется для объективов с апертурой 0,3...0,65, а участок IV обеспечивает фокусирование с объективами, апертура которых не превышает 0,3. Общее перемещение шарикоподшипника – 2...3 мм. На рукоятке 1 эти рабочие участки могут быть выделены белым, зеленым и желтым цветом соответственно цвету обозначения апертуры объективов на их оправках. Участок V используется для быстрого опускания направляющей до участка VI (грубая подача). Рычаг 4 вместе с шарикоподшипником 3 можно вращать винтом 7, что позволяет регулировать верхнее положение направляющей при разной толщине

a)



б)

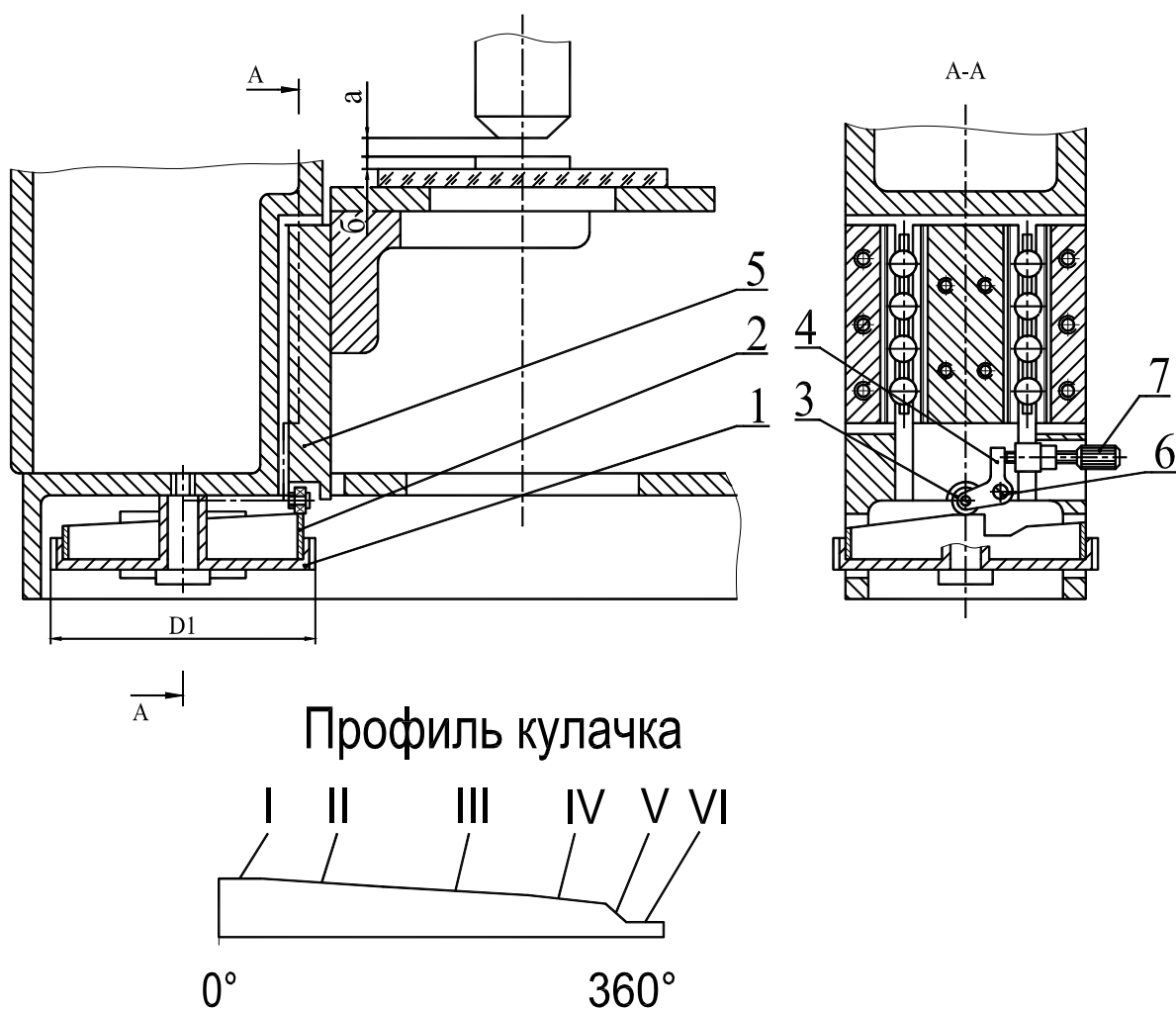


Рис. 5.11. Кинематические схемы фокусирующих механизмов с одной направляющей и одной рукояткой

предметных стёкол. Механизм обеспечивает безопасную работу на приборе (сохранность препарата), т.к. верхнее положение направляющей не может быть изменено оператором. Механизм имеет минимальный мёртвый ход.

Упражнение: составьте структурные схемы механизмов, показанных на рис. 5.11а и 5.11б.

5.4.2.2. Конструкция фокусировочных механизмов микроскопов

Конструкция ФМ микроскопа состоит из трёх частей:

- а) привода, включающего кинематические цепи механизмов тонкой и грубой подач с рукоятками управления;
- б) направляющих;
- в) упоров.

Конструкция направляющих в основном определяет жесткость ФМ и влияет на мертвый ход. В ФМ используют направляющие с трением скольжения, качения и молекулярным трением, рассмотренные в гл. 4.

Конструкция ФМ с отдельными механизмами тонкой и грубой подач показана на рис. 5.12. В механизме тонкой подачи 1 используется зубчато-рычажный механизм Мейера 2, кинематическая схема которого показана на рис. 5.6а. При вращении рукоятки 3 движение передается на штифт 4 и далее на направляющую 5 типа "ласточкин хвост". Рукоятка 3 снабжена пружинной предохранительной муфтой. Пружина 6 обеспечивает силовое замыкание звеньев. Механизм грубой подачи 7 имеет рукоятки 8, с помощью которых через шестерни 9, 10 и рейку 11 перемещается направляющая 12. Для регулировки тугости вращения шестерни 9 предусмотрен механизм, состоящий из конусных втулок 13 с разрезом и гайки 14. При небольшом повороте в противоположные стороны рукояток 8 поворачиваются через шестерни гайки 14 и, перемещаясь по резьбе, выполненной на концах шестерни 9, поджимают конусные втулки 13, изменяя тем самым момент на рукоятках 8.

На рис. 5.13 изображена схема конструкции ФМ с одной направляющей и одной рукояткой. При вращении рукоятки 3 винт 2 перемещает поступательно червяк 4 с помощью резьбы, нарезанной на правом конце. Перемещение червяка вызывает поворот колеса 5, которое через дополнительную шестерню и рейку перемещает направляющую. Так производится тонкая подача. Ее величина определяется углом, в пределах которого штифт 1 может поворачиваться свободно. Этот угол соответствует поступательному перемещению направляющей на 0,1 мм. Как только штифт 1 упирается в боковую сторону паза (см. сечение АА), червяк 4 начинает вращаться и вращает колесо 5. Так происходит грубое перемещение.

ФМ с одной направляющей и двумя соосными рукоятками по кинематической схеме (см. рис. 5.7а) показан на рис. 5.14. При вращении рукоятки 1 винтом 2 перемещается гайка 3, которая через оси 4, кольцо 5 и

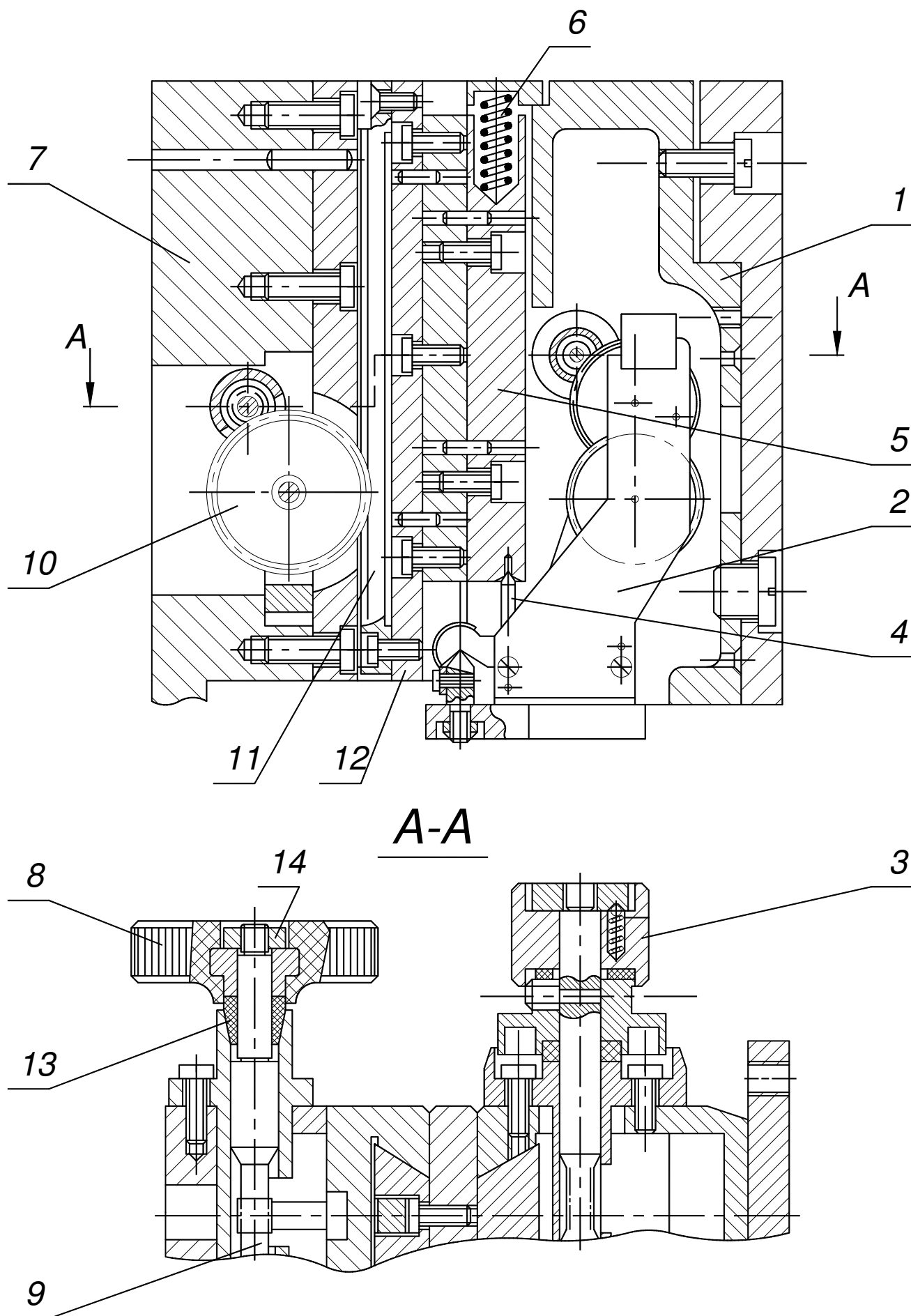


Рис. 5.12. Механизм с раздельными рукоятками

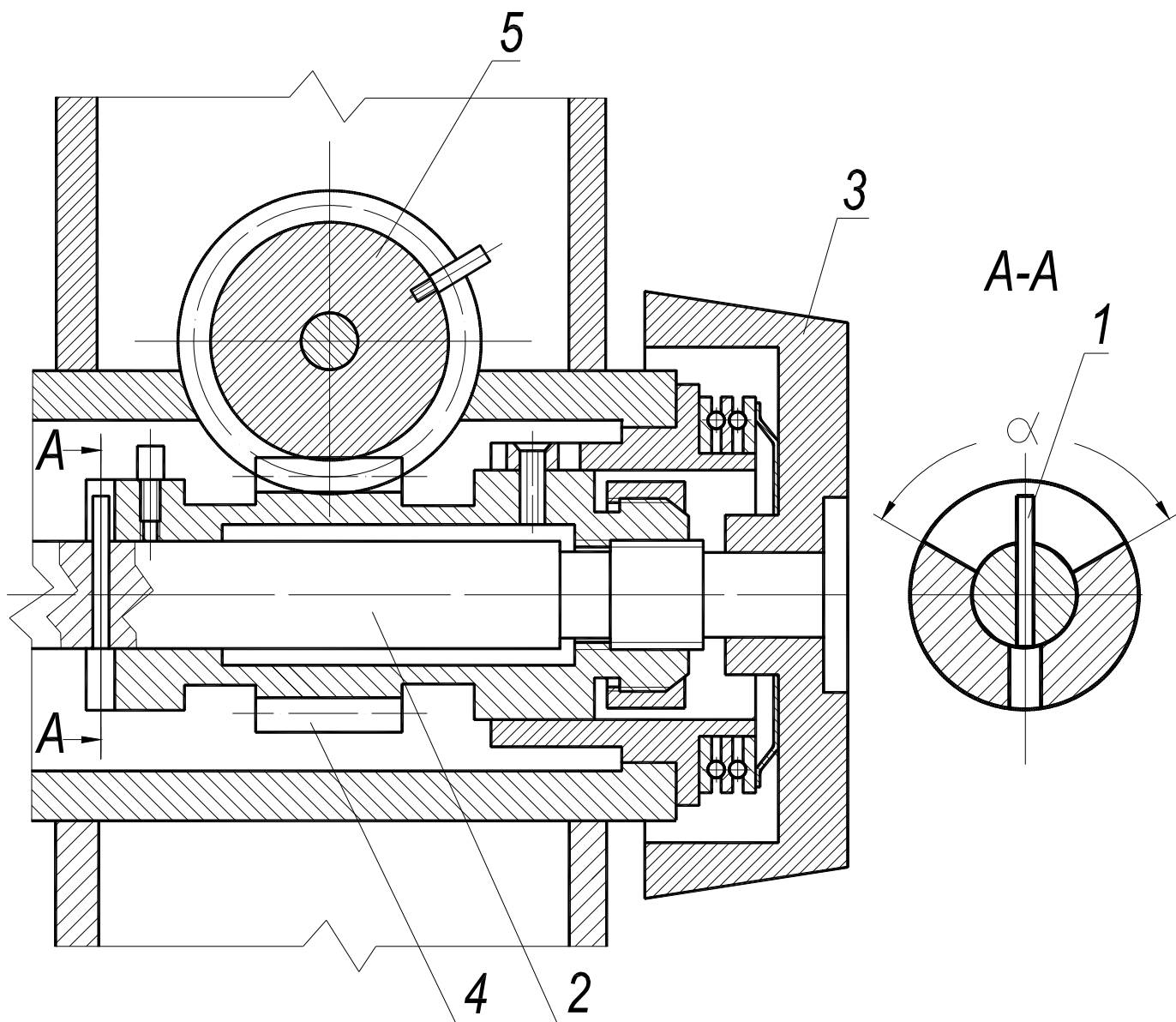


Рис. 5.13. Фокусировочный механизм с одной рукояткой и одной направляющей

оси 6 поступательно перемещает червяк 7, который поворачивает шестерню 8. Далее движение шестерни 9 через рейку 10 передается на направляющую качения 11. Грубая подача осуществляется с помощью рукоятки 12 через втулку 13, оси 6, червяк 7 и далее через звенья 8 – 11. В этом случае червяк 7 имеет вращательное движение. Рукоятки 1 имеют пружинные предохранительные муфты 14. Упоры 15 ограничивают диапазон тонкой подачи. Ограничение величины хода грубой подачи производится следующим образом: в верхнем положении направляющей 11 расцепляется шестерня 9 и рейка 10, в нижнем положении направляющей 11 при расцеплении шестерни 9 и рейки 10 пружина 18 поднимает направляющую 11 вверх. Пружина 17 выполняет силовое замыкание кинематических цепей. Диапазон тонкой подачи равен 4 мм, грубой – 40 мм. Цена деления на шкале 18 – 0,002 мм.

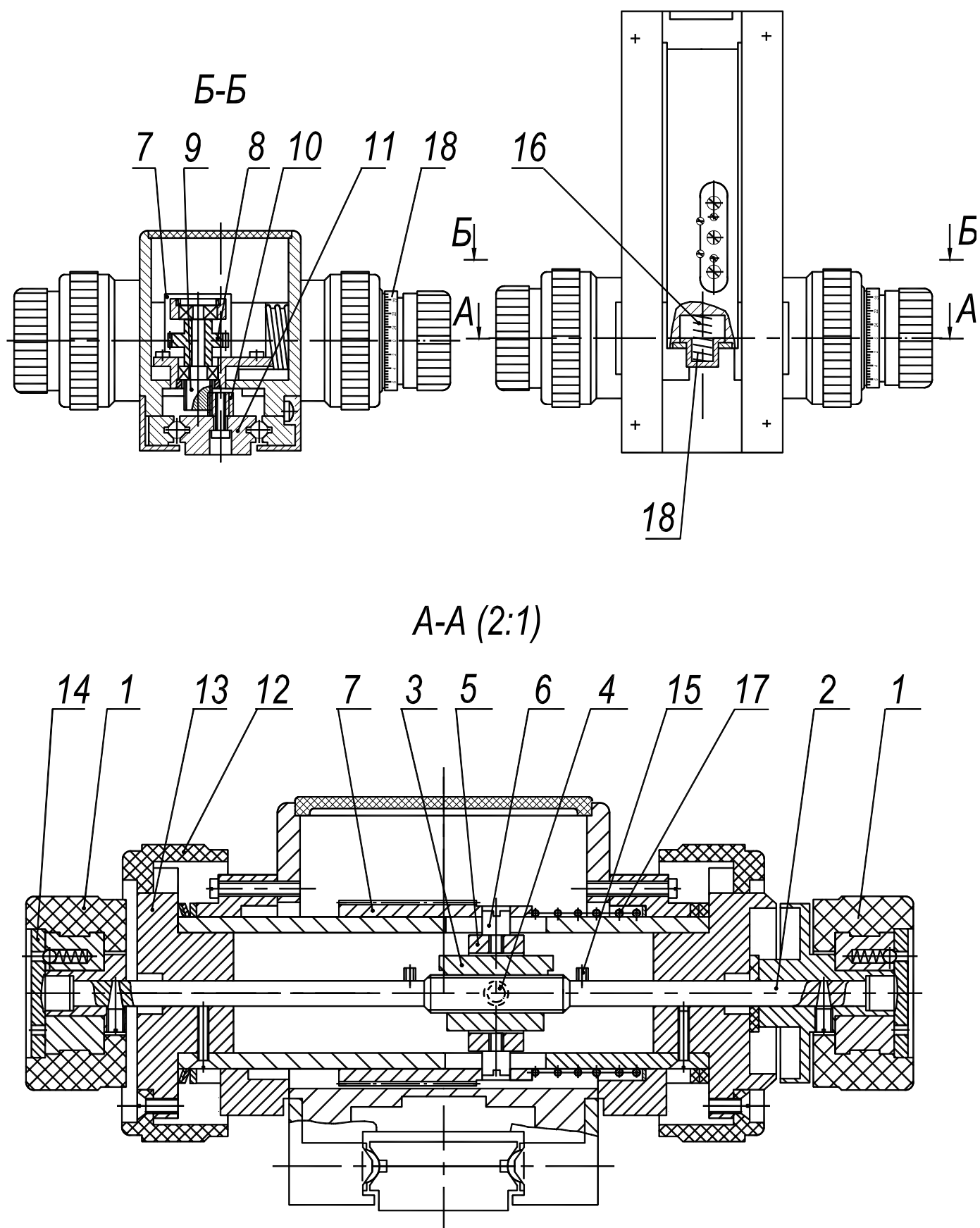


Рис. 5.14. Фокусировочный механизм с соосными рукоятками

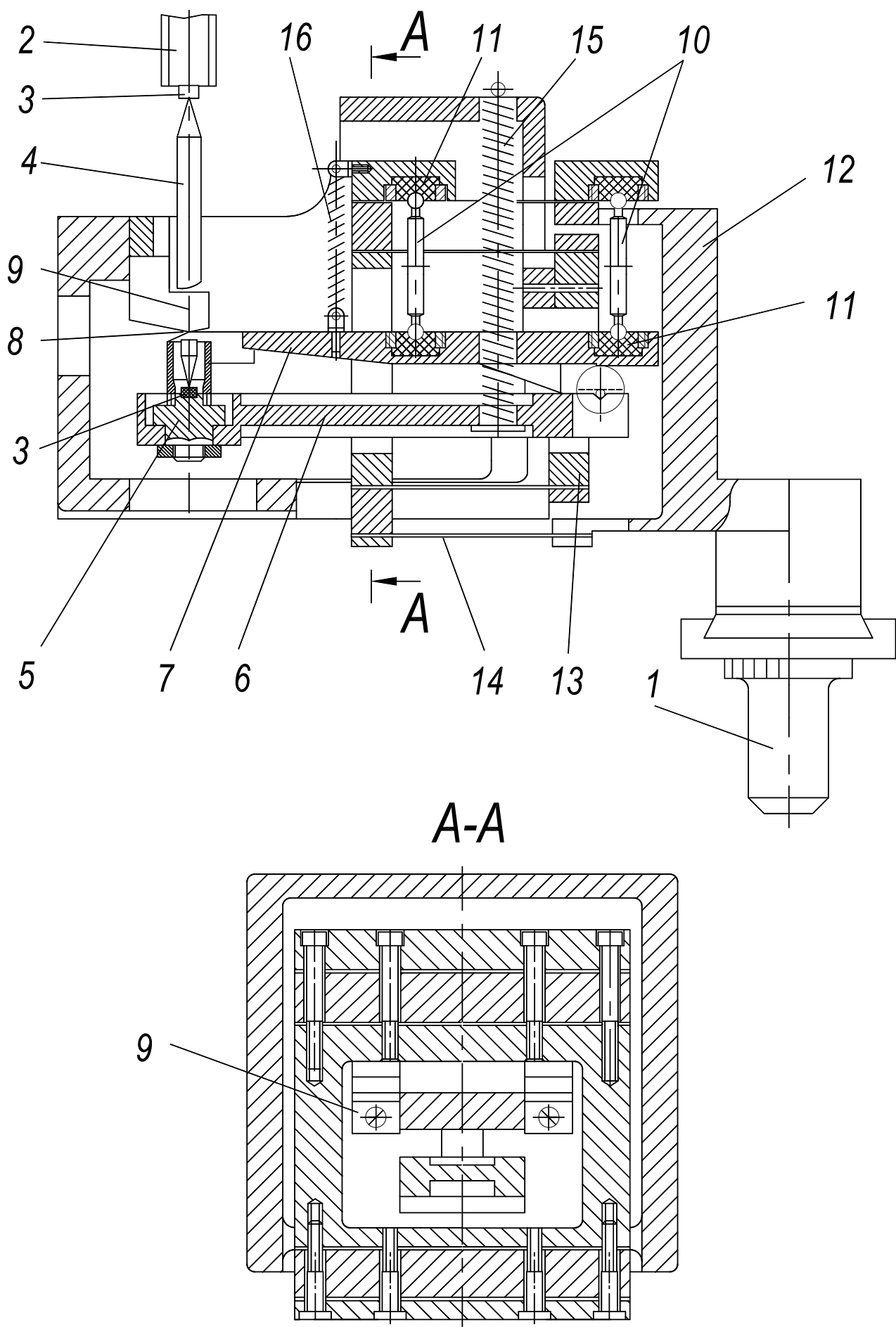


Рис. 5.15. Фокусирующий механизм с упругими направляющими

На рис. 5.15 приведена схема ФМ с двумя направляющими и двумя рукоятками управления, который применяется в микроскопе для перемещения объектива, случайные отклонения траектории которого в пространстве не должны превышать 0,03 мкм. Поэтому в механизме точной подачи применены упругие направляющие (см. рис. 5.6з) и конструктивные решения, обеспечивающие минимальное влияние усилий, возникающих в приводе и направляющих на положение в пространстве объектива 1 (см. рис. 5.15). Величина усилий не должна превышать 0,05 Н. Поступательное перемещение винта 2 через сапфировые опоры 3 передается иглой 4 на опору 5 и рычаг 6, который в свою очередь поворачивает рычаг 7 вокруг оси 8, образованной плоскими пружинами 9. Иглы 10, которые фиксируются фторопластовыми опорами 11, передают качание рычага 7 на два пружинных параллелограмма 12 и 13, образованных восьмью плоскими пружинами 14. Пружины 15 и 16 обеспечивают силовое замыкание звеньев.

У микроскопов при использовании объективов с большими увеличениями и апертурами рабочее расстояние между фронтальной линзой микрообъектива и предметным стеклом или другим объектом составляет доли миллиметра (от 0,05 до 0,3 мм). Поэтому актуальной задачей для конструктора ФМ является предохранение объектов, объективов и конденсоров от повреждения при их перемещении вдоль оптической оси.

Поскольку толщина предметных стёкол колеблется в пределах $\pm 0,1$ мм, для потребителя весьма удобно иметь возможность фиксации при смене объекта плоскости, близкой к плоскости резкого изображения. С этой целью в ФМ микроскопов вводится упор, фиксирующий положение системы “объект – объектив” вдоль оптической оси.

Рассмотрим структурные схемы предохранительных систем. Возможны следующие варианты:

- схема ФМ обеспечивает постоянный зазор системы “объект – объектив”; такое требование легко может быть выполнено только в схемах, имеющих одну направляющую и одну рукоятку для тонкого и грубого движений, т.е. в механизмах, схемы которых показаны на рис. 5.11

- упоры могут ограничивать перемещение направляющей или привода, тогда в качестве упоров используют только механические устройства, как наиболее простые.

На рис. 5.16а в общем виде показана структурная схема предохранительных упоров, ограничивающих перемещение направляющей, а на рис. 5.16б в схеме ограничение движения выполнено в приводе.

Упоры направляющих в простых моделях осуществляют с помощью винтов и других элементов, имеющих перемещение. Их главный недостаток заключается в том, что привод может быть использован

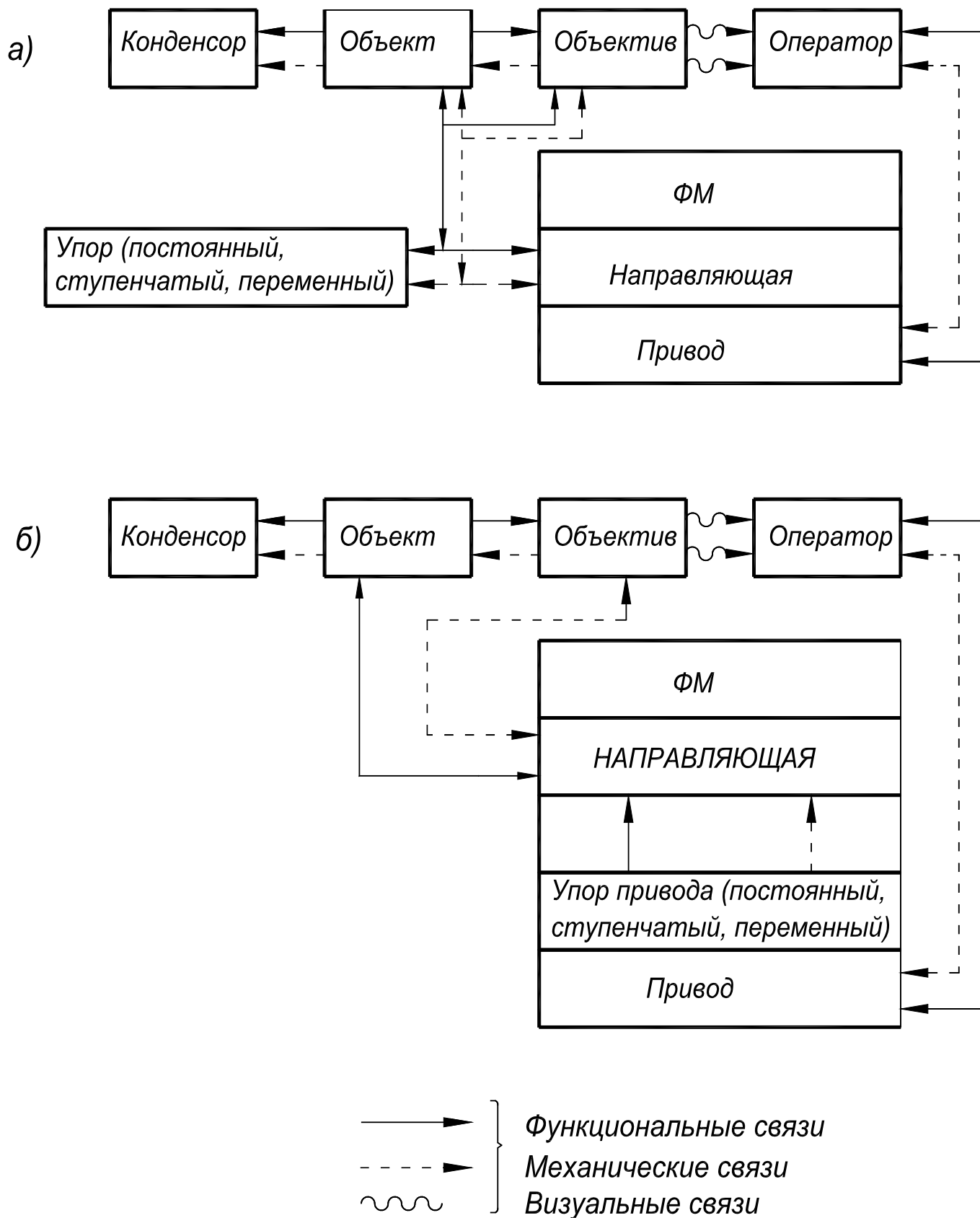


Рис. 5.16. Структурные схемы предохранительных устройств фокусировочных механизмов

оператором при фиксированном положении направляющей. Поскольку между направляющей и рукоятками находится передаточный механизм с большим передаточным числом, то оператор при вращении рукоятки не чувствует увеличение нагрузки и при дальнейшем вращении рукоятки может произойти поломка передаточного механизма. Поэтому в современных микроскопах используют упоры, установленные в приводе (рис.5.17) и ограничивающие рукоятки грубой подачи. На рис. 5.17а изображена конструкция с кулачковыми шайбами, позволяющая ограничивать вращение оси грубой подачи через несколько оборотов.

Упор 1 кулачковых шайб 2 установлен на корпусе прибора. На оси грубой подачи 3 закреплён диск 4 с упором 5. При вращении рукоятки грубой подачи 6 упор 5 поворачивает кулачковые шайбы 2 до тех пор, пока они не упрутся в упор 1.

Угол поворота оси 3 определяется углом α кулачка. Число K кулачковых шайб считают по формуле

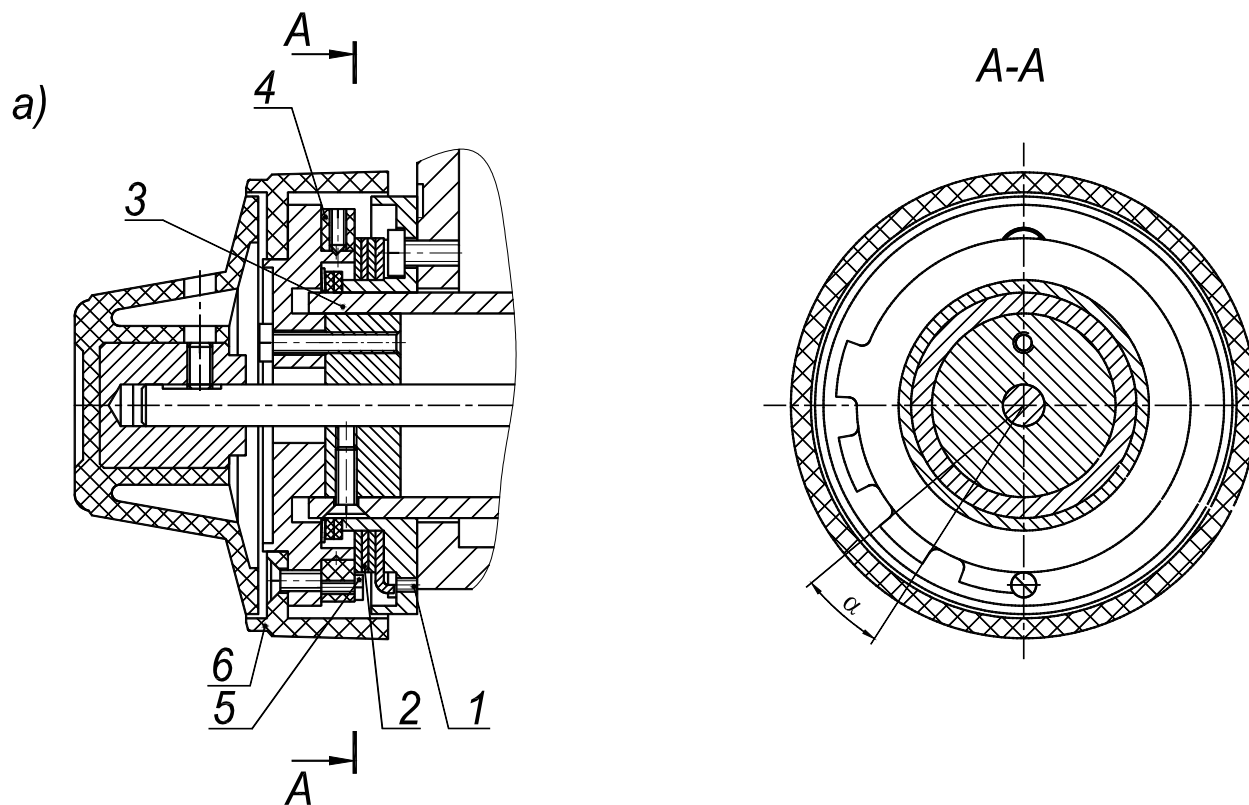
$$K = \frac{360n}{360 - 2\alpha} - 1.$$

Обычно значение K получается дробным, его округляют до целого числа, а излишек угла поворота компенсируют изменением положения упора 5. При установке эксплуатационного постоянного зазора поворачивают диск 4 и закрепляют его на оси 3. В более универсальных моделях микроскопов предусматривают возможность изменения зазора, что необходимо при изменении толщины предметных стёкол толщиной от 0,9 до 1,2 мм, использовании камеры Гореева, имеющей толщину 6 мм, кювет с дном толщиной 2...3 мм и т.п.

С этой целью один из упоров сделан подвижным и может занимать необходимое положение. При этом подвижной упор в свободном соединении с помощью спиральной пружины постоянно прижимается к кулачковой шайбе.

Устройство регулируемого упора показано на рис. 5.17б. На рукоятке грубой подачи 1 установлено регулировочное кольцо 2 с упором 3, а на подшипнике 4 вращается поворотное кольцо 5 с упором 6. Фиксация кольца 5 на подшипнике 4 осуществляется с помощью зажимной рукоятки 7. Между упорами 3 и 6 расположены кулачковые шайбы 8 с выступами 9. Цилиндрическая пружина 10 при отпущенной рукоятке 7 прижимает упор 6 через выступы 9 кулачковых шайб 8 к упору 3 регулировочного кольца 2.

Установку предохранительного упора в нужном положении выполняют следующим путём. Рукоятку грубой подачи 1 вращают, пока микроскоп не будет сфокусирован на объект. Вместе с рукояткой грубой подачи 1 вращается регулировочное кольцо 2, упор 3, кулачковые шайбы 8, упор 6 и поворотное кольцо 5. После окончания фокусирования поворотом зажимной рукоятки 7 прижимают поворотное кольцо 5 к торцу



Кулачковый упор

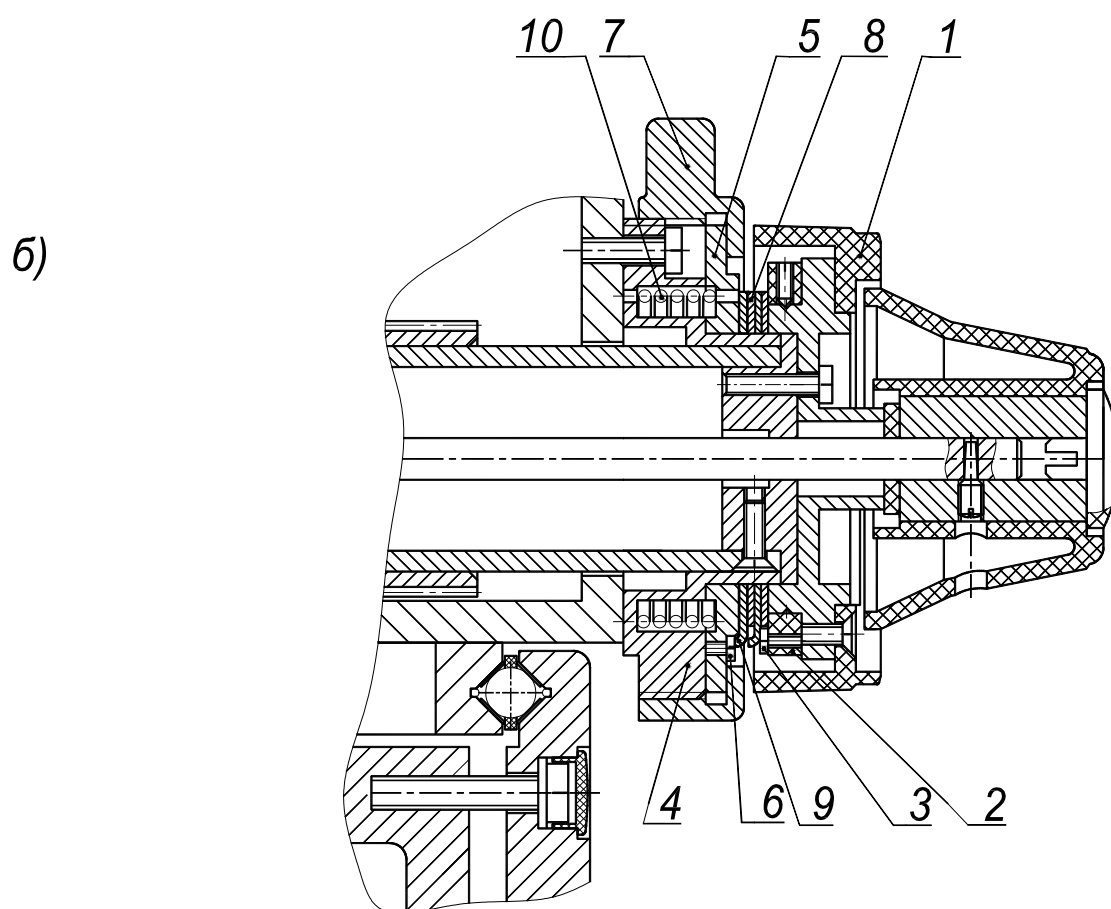


Рис. 5.17. Упоры фокусировочных механизмов

подшипника 4. При этом фиксируется и положение упора 6. При вращении рукоятки грубой подачи 1 в обратном направлении она сможет сделать то число оборотов, на которое рассчитаны выступы кулачковых шайб 9. При возвращении рукоятки грубой подачи 1 в исходное положение упоры 3 и 6 занимают установленное положение, обеспечивая необходимое фокусирование микроскопа.

Вследствие неточности изготовления деталей, отклонений толщины предметных стёкол и по другим аналогичным причинам появляется разница в исходных сфокусированных положениях микроскопа. Для их компенсации регулировочное кольцо 2 может быть повернуто на требуемую величину.

5.4.2.3. Информационное моделирование и краткосрочное прогнозирование ФМ микроскопов

Информационное моделирование (см. ч.I, гл. 5.3.6) на базе научно-технической информации применяется в практике проектирования ФМ и позволяет выполнять достаточно достоверный краткосрочный или среднесрочный прогноз промышленных образцов с опережением на 5...10 лет. По мере увеличения объема и широты используемой информации, охвата свойств повышается степень обоснованности прогноза и модели механизма.

При моделировании схем и конструкций большой интерес представляет патентная информация, которая отличается новизной, достоверностью, концентрированностью и достаточной полнотой. Она создает предпосылки для выявления тенденций развития ФМ. Информация, содержащаяся в каталогах фирм, производящих микроскопы, позволяет оценить технический уровень разрабатываемого ФМ и тенденции развития производства. Количественные характеристики параметров ФМ излагаются в теоретических и экспериментальных исследованиях, а мнение потребителей представляет большой интерес при оценке эксплуатационных свойств.

При составлении информационной модели следует выявить и перспективные принципы действия, основанные на новых физических явлениях, например, использование памяти металлов, магнитных жидкостей и т.п.

Информационная модель имеет вид таблицы, в строках которой перечислены свойства (параметры, технические решения или другие характеристики), а в колонках дана количественная или качественная оценка этих свойств по разным источникам информации. Общая оценка каждого свойства определяется как сумма (аддитивная модель) или произведение (мультипликативная модель) соответствующих компонентов, а также экспертным путем.

В качестве примера (см. ч. I, гл. 5.3.6) была приведена информационная модель ФМ, использованная при разработке агрегатно-

-модульных микроскопов единой системы "ЕС МИКРАМ".

Из представленной модели следует, что наиболее прогрессивно фокусирование перемещением столика, но при этом жесткость конструкции серийных приборов оказывается недостаточной. Резонансная частота ФМ расположена в области относительно низких частот, которые характерны для промышленных зданий. Это затрудняет использование приборов вследствие их недостаточной виброустойчивости, особенно при фотографировании с малыми экспозициями.

Кинематические схемы отличаются большим разнообразием, с преимущественным использованием для грубой подачи зубчато-реечных механизмов и применением в качестве движителя трибки.

В новых конструкциях используется одна общая направляющая для грубой и тонкой подач с трением качения. Управление ФМ производится преимущественно двумя соосными, горизонтальными рукоятками. Начинают использовать и одну рукоятку для обеих подач.

Используя информационную модель, разработчик может определить положительные и отрицательные стороны созданной им конструкции, оценить ее уровень и выявить те свойства ФМ, которые следует, с учетом их целесообразности, ввести в конструкцию. Аналогичная методика может быть использоваться и для информационного моделирования ФМ других ОП.

5.4.3. Фокусировочные механизмы фотоаппаратов и других фотосистем

Фокусирование фотоаппаратов заключается в перемещении объектива (всего или какой-либо его части) вдоль оптической оси с целью совмещения изображения объекта с плоскостью приемника. В павильонных и старых конструкциях бытовых фотоаппаратов использовалось перемещение фотопластинок.

Величина перемещения фотообъектива Z' относительно исходного положения, за которое принимается положение задней фокальной плоскости объектива при положении объекта съемки в бесконечности, определяется приближенной формулой

$$Z' = \frac{lc - 2f'}{2} - \sqrt{\frac{lc^2}{4} - lcf'} , \quad (5.22)$$

где lc – расстояние от объекта до плоскости фотослоя,
 f' – фокусное расстояние объектива.

Визуальное фокусирование у простых фотоаппаратов выполняется следующими способами:

- по шкале расстояний;
- по символам;
- по матовому стеклу с использованием фокусировочных клиньев или

без них;

- с использованием микрорастров различной формы;
- с помощью дальномера, сопряженного с фотообъективом.

Фокусирование объектива по шкале расстояний – наиболее простой способ наводки на резкость. При совмещении нужного деления на шкале расстояний, которая обычно наносится на корпус объектива, и неподвижного индекса объектив перемещается на величину Z' в направлении снимаемого объекта.

Символьное фокусирование также используется в простых фотоаппаратах.

Шкалу расстояний в метрах заменяют три – четыре символа, соответствующих условным обозначениям сюжетов съемки ("портрет", "человек во весь рост", "группа людей", "пейзаж").

Фокусирование объектива по матовому стеклу сводится к получению на матированной поверхности резкого изображения объекта, причем это изображение рассматривается оператором непосредственно или через окуляр. Матированная поверхность располагается в плоскости последующего расположения фотослоя, или в другой плоскости, оптически сопряженной с плоскостью фотослоя. Фокусирование по матовому стеклу используется в зеркальных и павильонных фотоаппаратах, фотонасадках различных ОП и других аналогичных устройствах.

Фокусирование по матовому стеклу с использованием фокусируемых клиньев повышает точность фокусировки примерно в три раза. Схема действия клиньев показана на рис. 5.18а. Два оптических клина А и Б развернуты навстречу друг другу. Каждый клин отклоняет световые лучи 1А и 1В в сторону основания.

Поэтому рассматривая точку Р изображения, глаз будет видеть две точки Р_А и Р_В (картина 6, наблюдаемая через матовое стекло с клиньями, показана на рис. 5.18а внизу). При фокусировании объектив О перемещают до тех пор, пока в зоне клиньев не будет устранено двоение изображений. Это происходит в тот момент, когда изображение И совмещается с матированной поверхностью М.

В фотоаппаратах последних выпусков вместо клиньев применяют систему микропирамид, вершины которых совмещены с поверхностью М.

Фокусирование с помощью монокулярного дальномера (рис. 5.18б) основано на наблюдении одним глазом двух изображений объекта, образуемых лучами I и II.

Совмещение этих лучей осуществляется полупрозрачной пластинкой 2. При перемещении объектива 8 поворачивается вокруг оси О рычаг 6 совместно с зеркалом 5 и линзами 3. Объектив 7 перемещают до тех пор, пока оператор, наблюдая в окуляр 1, не добьется совмещения двух изображений объекта 4 в одно (показано на рис. 5.18б вверху). При этом изображение объекта будет совмещено с плоскостью фотоматериала 8. В дальномере могут применяться и другие компенсаторы: клинья,

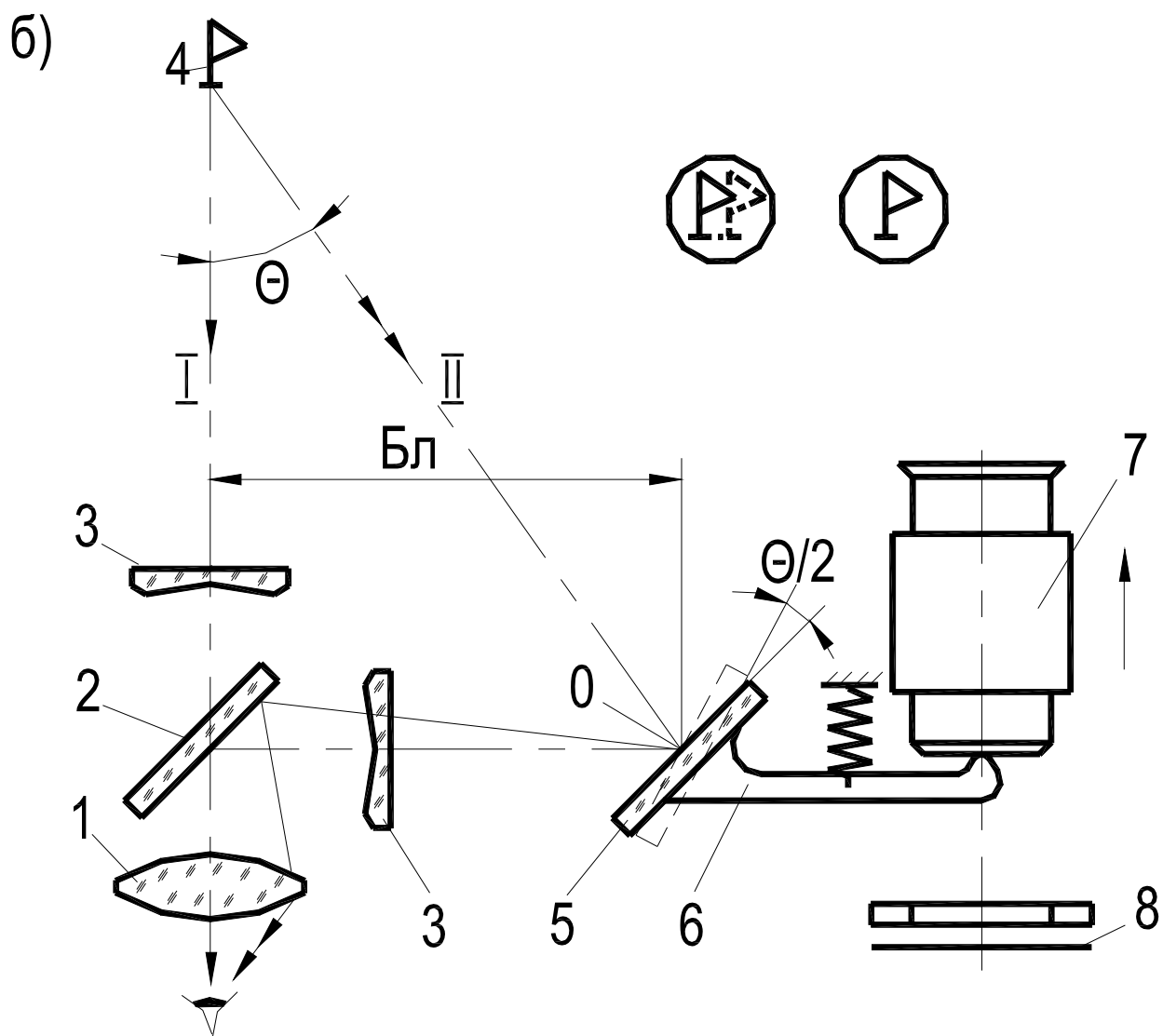
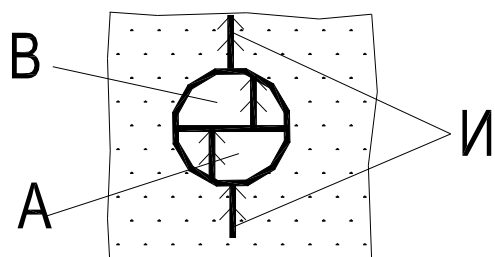
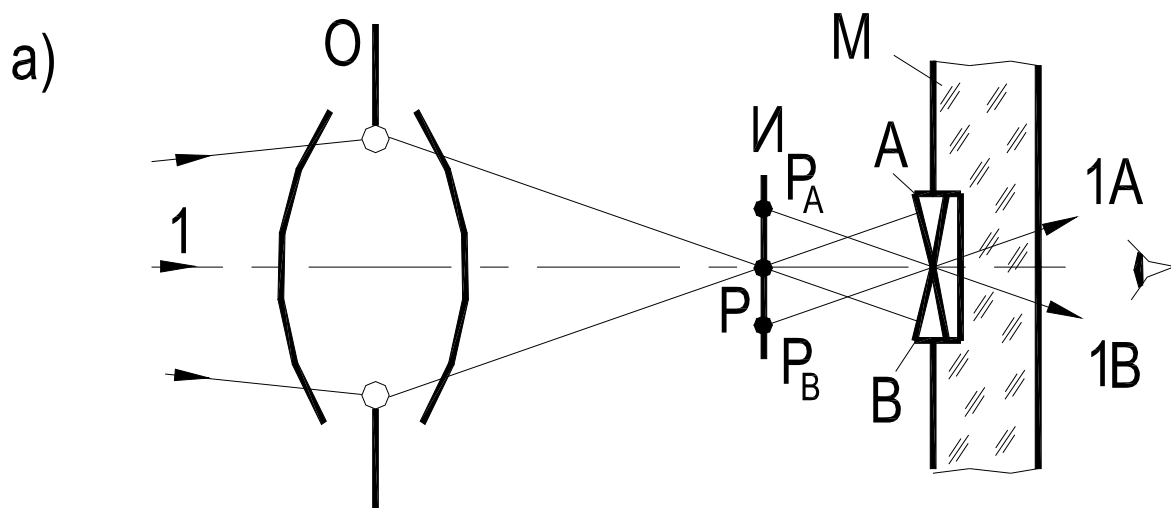


Рис. 5.18. Фокусирование фотоаппаратов

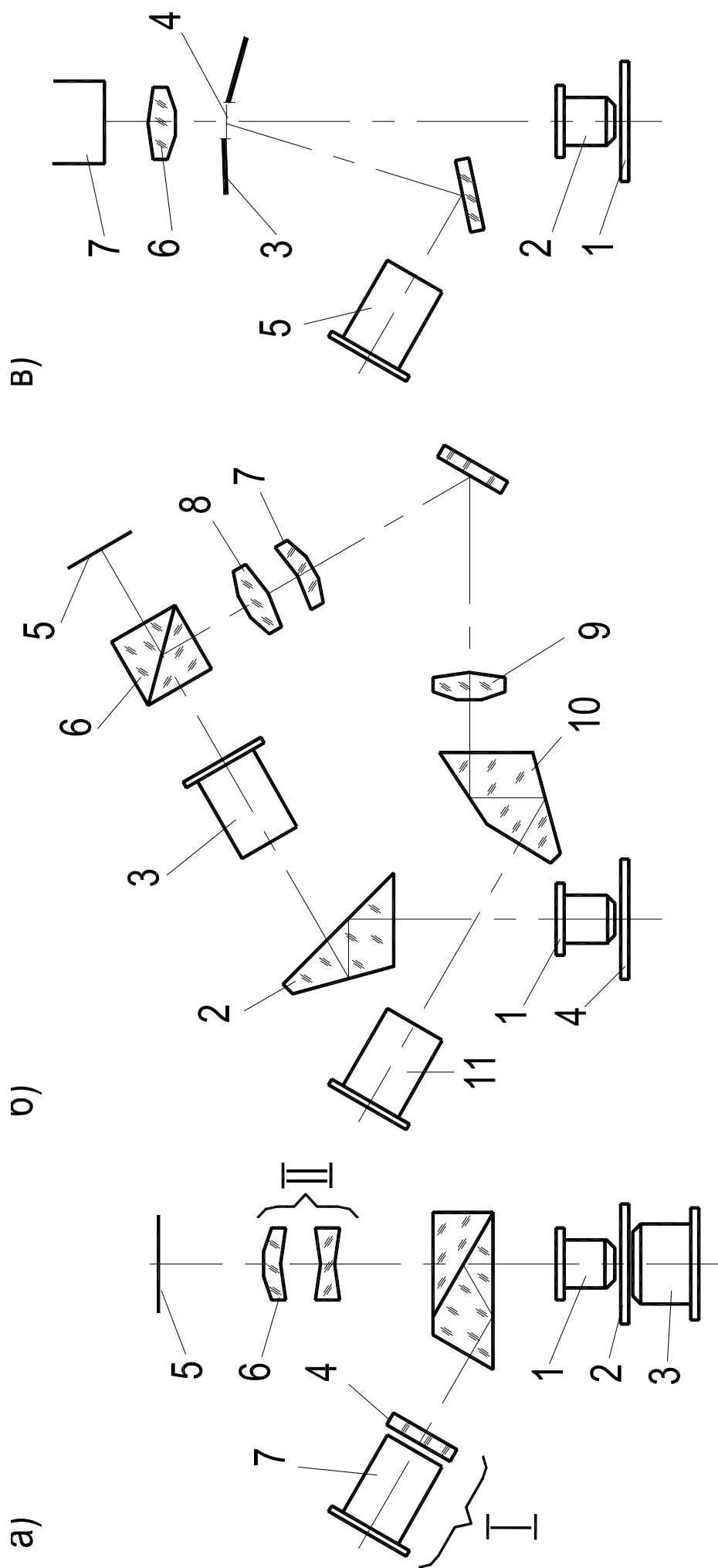


Рис. 5.19. Фотосистемы микроскопов

цилиндрические линзы и др.

Рассмотрим ФУ с ручным управлением, используемые в микроскопах, снабженных фотосистемами. На рис. 5.19а приведена оптическая схема фотонасадки микроскопов. Объектив 1 проектирует объект 2, освещаемый конденсором 3, в канал визуального наблюдения I и фотосистему II. Канал визуального наблюдения I имеет марку 4, сопряженную с плоскостью фотокадра 5. На марке 4 нанесена рамка, соответствующая размеру фотокадра 5. Изображение объекта 1 проектируется на фотокадр 5 проективом 6. Сопряжение марки 4 и фотокадра 5 производится с помощью перемещения проектива 6 при заводской юстировке ОП. Через окуляр 7 осуществляется наблюдение за объектом. Фокусирование осуществляют перемещением объекта 2 или объективом 1 вместе с фотонасадкой.

Оптическая схема фотомикроскопа показана на рис. 5.19б. Объектив 1, призма 2 и сменные фотоокуляры 3, имеющие увеличение от 3 до 10^x , изображают объект 4 на фотокадре 5. Светоделительная призма 6 направляет 10% светового потока 7 в дополнительный канал, с помощью которого контролируется наводка на резкое изображение. Для этого предусмотрена сетка 7, нанесенная на коллектив, на которую проектируется линзой 8 изображение объекта 4. Сетка сопряжена с плоскостью фотокадра 5. Далее изображение объекта 4 и сетки 7 линзой 9 и призмой 10 направляется в окуляр 11.

Наличие дополнительного канала позволяет наблюдать за объектом в процессе съемки, что особенно важно при фотографировании живых организмов.

Аналогичная задача контроля фокусировки возникает и при фотометрировании объектов на микроскопе (рис. 5.19в). Объект 1 объективом 2 проектируется на сферическую зеркальную поверхность зеркала 3. На зеркальном покрытии выполнено отверстие 4 диаметром от 0,03 до 0,1 мм. Поэтому в поле зрения наблюдатель через окуляр 5 видит изображение объекта и темной точки на нем, что позволяет ему выбрать необходимое место на фотометрируемой клетке биологического или иного объекта. Через отверстие 4 часть светового потока, прошедшего через объект, после линзы 6 попадает на приемник излучения 7.

5.4.4. Фокусировочные механизмы интерферометрических приборов

В основе действия интерферометров лежит принцип взаимодействия колебаний световых волн. Поэтому устройства, служащие для управления волновыми поверхностями, должны обеспечивать их коррекцию в долях длины волны (до тысячных долей микрометра и до угловых секунд). По принципу действия эти устройства можно отнести к ФМ.

Схема механизма эталонного зеркала микроинтерферометра, используемого для перемещения интерференционных полос в поле зрения, показана на рис. 5.20. При вращении винта 1 через шайбу 3 происходит

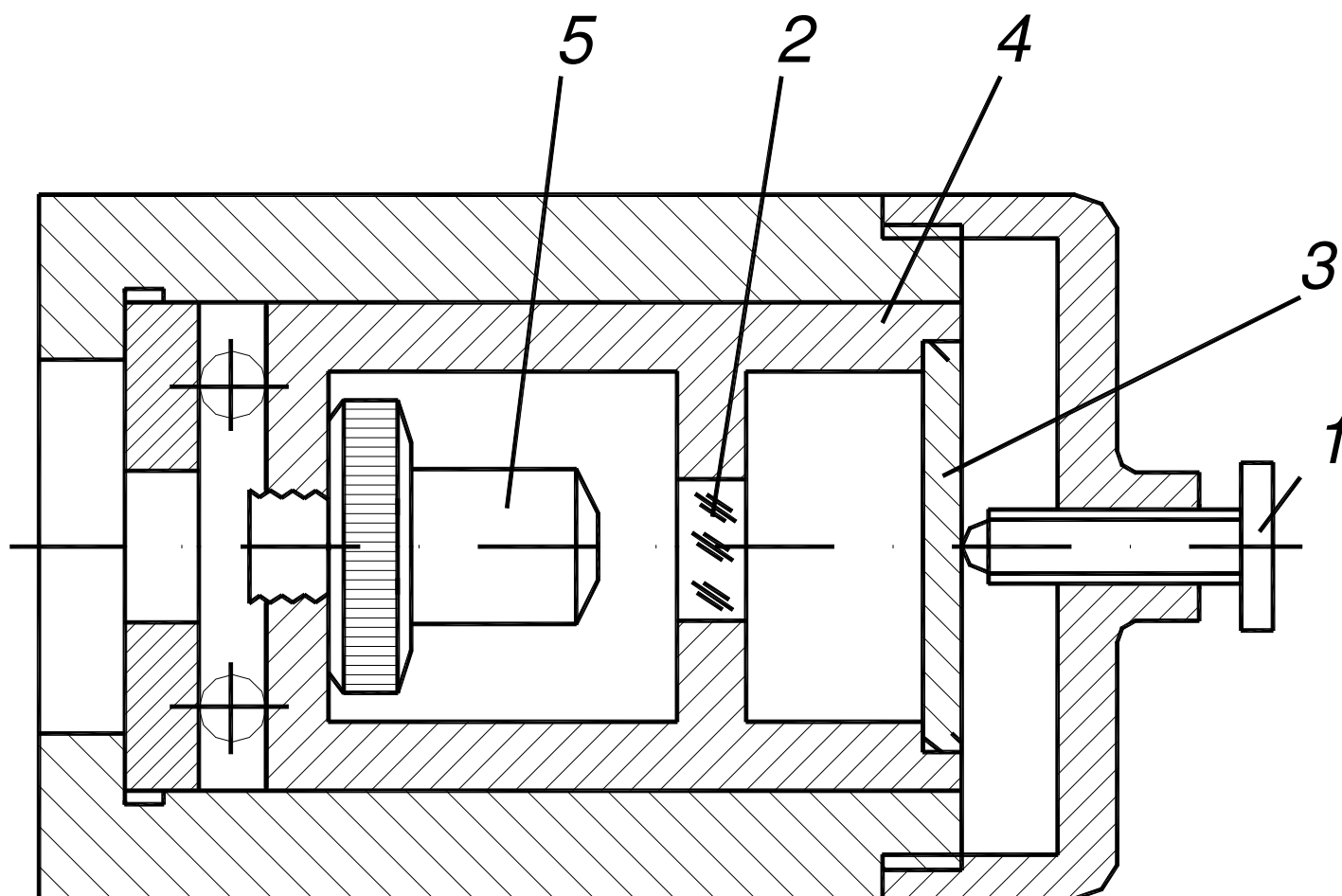


Рис. 5.20. Фокусировочный механизм микроинтерферометра

упругая деформация втулки 4 вдоль оптической оси. При этом происходит изменение расстояния между зеркалом 2 и микрообъективом 5 и перемещение интерференционных полос в поле зрения микроинтерферометра при настройке прибора. При вращении втулки 4 происходит поворот полос.

Рассмотрим интерферометры Фабри-Перо, которые используют при самостоятельных измерениях и исследованиях в аэрогазодинамике, диагностике плазмы, контроле оптических деталей, в спектроскопии высокой разрешающей способности, в качестве резонаторов лазеров и т.д.

Конструкции ФМ интерферометров Фабри-Перо можно разбить на четыре группы (рис. 5.21а). К первой группе относятся интерферометры, имеющие одно неподвижное зеркало, закрепленное в корпусе прибора. Второе зеркало при этом поджимается к распорному кольцу через механизм, позволяющий изменять взаимное расположение зеркал. В интерферометрах второй группы положения зеркала регулируются, благодаря деформации распорного кольца. Третья группа содержит два узла с зеркалами, имеющими независимые регулировки. Четвертая группа приборов имеет нерегулируемые зеркала.

При тонкой регулировке обычно изменяют расстояние между

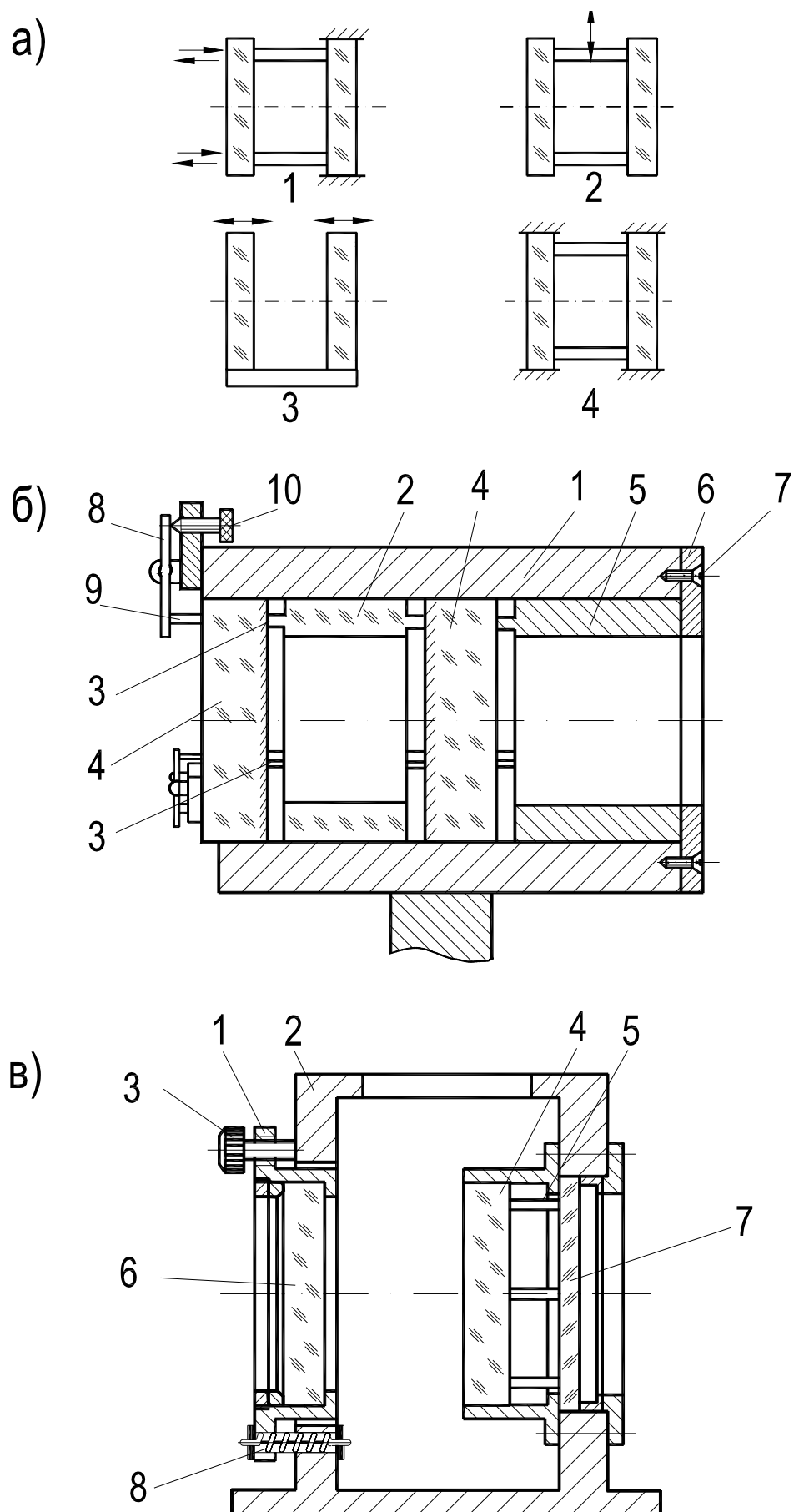


Рис. 5.21. Фокусировочные механизмы интерферометров Фабри-Перо

зеркалами, используя несколько способов: упругие деформации деталей, обратный пьезоэффект, термическое расширение деталей, изменение плотности среды в пространстве между зеркалами и другие принципы действия.

Широко распространенная конструкция интерферометра Фабри-Перо, в которой используются сменные распорные кольца, показана на рис. 5.21б. В стальной трубе 1 располагаются зеркала 4, разделенные стеклянным или инварным кольцом 2, имеющим на каждом торце три выступа 3. Опорные площадки выступов 3 отполированы и параллельны друг другу в пределах одной длины волны. Суммарная длина колец 2 и 5 одинакова для сменных комплектов, что позволяет собрать интерферометр Фабри-Перо с разными толщинами. Кольцо 5 опирается на кольцо 6 и винты 7. С другой стороны корпуса расположены три стойки, в которых расположены пружины 8 с выступами 9. При вращении винтов 10 пружины 8, выступы 9 деформируют в пределах упругих деформаций кольца 2 и 5 и позволяют установить зеркала с параллельностью до $0,01\lambda$.

На рис. 5.21в приведена схема интерферометра с дистанционной регулировкой, основанной на обратном пьезоэффекте. В корпус 2 укреплена втулка 1 с зеркалом 6. Грубая регулировка зеркал достигается с помощью трех регулировочных винтов 3. Пружины 8 обеспечивают силовое замыкание. Зеркало 4 приклеено с помощью трех втулок 5 из титаната бария к стеклянной пластине 7. Деформация втулок 5 осуществляется при подаче напряжения к внешней и внутренней стенкам каждой из втулок.

В спектрометрах с интерференционной селективной модуляцией и Фурье-спектрометрах модуляцию светового потока производят с помощью перемещения одного из зеркал. При этом с целью получения максимальной разрешающей способности перемещение зеркала может достигать одного – двух метров.

При перемещении зеркала на всю длину его наибольший наклон не должен превышать одной угловой секунды. Поэтому особое внимание обращается на конструкцию направляющих зеркала, в качестве которых используют пружинные, газовые и другие особо точные направляющие (см.гл.4.3).

5.5. Автоматическое фокусирование

Системы автоматического фокусирования (САФ) можно рассматривать как системы автоматического управления, служащие для получения резкого изображения объекта без участия человека для оценки качества наводки. Они получили достаточно большое распространение в оптическом приборостроении и используются в фото- и киноаппаратуре, видеоаппаратуре, микроскопах, диа- и кинопроекторах, в системах с адаптивной оптикой и в системах машинного зрения (СМВ), космической аппаратуре и т.д. Мировой выпуск фотоаппаратов с автоматической

фокусировкой составляет миллионы штук в год.

Быстрое распространение автоматизации фокусирования, несмотря на усложнение схем и конструкции ОП, вызвано следующими причинами:

- повышением точности по сравнению с ручным фокусированием;
- сокращением времени фокусирования;
- возможностью фокусирования в невидимой части спектра;
- использованием САФ в тех случаях, когда присутствие человека невозможно или нежелательно (например, в космической аппаратуре, в помещениях с опасной для человека средой и т.п.);
- необходимостью сохранения резкого изображения при перемещении объекта или ОП в плоскости, перпендикулярной к плоскости оптической оси (например, в лазерных видеопроигрывателях, при изготовлении и контроле микросхем и т.д.). При таких перемещениях объекта обычно имеют место наклоны объекта, опорных плоскостей направляющих или перемещения объекта относительно оптической оси.

Эти и другие подобные причины приводят к нарушению резкого изображения.

При классификации существующих САФ, как правило, учитывают следующие признаки:

- принцип действия. Различают два типа: САФ, основанные на анализе резкости изображения, и САФ, использующие измерение расстояния до объекта;
- способ использования при фокусировании светового потока. Если световой пучок испускается объектом или отражается от него, такая САФ относится к пассивной. Если на объект направляется модулированное излучение оптического или иного диапазона и после отражения от объекта это излучение используется в САФ, то система относится к активной. К активной САФ относится и способ структурированной подсветки, применяемый в системах машинного зрения. При нем методом триангуляции анализируется деформированный след линий подсветки (прямых, окружностей и т.п.) и определяется пространственная форма поверхности объекта;
- назначение оптического прибора (фотоаппарат, микроскоп, СМВ, адаптивные системы телескопов и лазерных приборов и т.д.);
- виду объекта, на который производится фокусирование (объемный натуральный объект, плоский тест-объект, решетка и т.п.);
- степень автоматизации – автоматическая или полуавтоматическая. При последней – после автоматической наводки на резкое изображение последующие действия выполняет оператор;
- характер связи между ПИ (или ВУ) и ФУ (корректором). Различают САФ с прямой и обратной связью;
- способ получения оптического сигнала – интегрального или дифференциального (сканирование);
- используемый параметр электрического сигнала ПИ (амплитуды

или фазы);

– по типу ПИ.

5.5.1. Системы автоматического фокусирования фотоаппаратов

Рассмотрим несколько САФ с прямой связью, используемых в фотоаппаратах.

Схема пассивного типа с многоэлементным фотоэлектрическим приемником излучения и фотообъективом показана на рис. 5.22а. Система состоит из внутрибазового дальномера, снабженного неподвижным зеркалом 1 и поворотным зеркалом 5, разнесенных на длину базы Б. Если объект съемки находится на расстоянии "А" от фотоаппарата, то для совмещения двух изображений необходимо компенсировать параллактический угол α поворотом зеркала 5 на угол $\alpha/2$. Два идентичных объектива 2 и 4, призма 3 направляют световые пучки на две линейки фотоприемников. Если на соответствующие элементы ячеек действуют одинаковые световые потоки, что сигнализирует о наводке на объект, то в схему поступает наибольший сигнал. При этом с помощью дополнительных устройств происходит осевое перемещение объектива на необходимую величину. Погрешность фокусировки Δl при контрасте $K = 0,2 \dots 0,4$ составляет $0,015 \dots 0,03$ мм.

Схема автоматического ультразвукового дальномера активного типа используется фирмой "ПолярOID" и показана на рис. 5.22б. Расстояние до объекта съемки 1 измеряется с помощью ультразвукового локатора, включающего вибратор 2, электронные блоки 3, 4, генератор стабилизированной частоты 5 и блок счета импульсов 8. По числу принятых импульсов определяется время распространения ультразвука от фотоаппарата и обратно. Затем объектив 6 устанавливается мотором 7 в необходимое положение в диапазоне от 25 см до бесконечности. Погрешность фокусирования составляет $\pm 0,1$ мм.

В схемах с обратной связью оптический сигнал, используемый для управления положением объектива, проходит через тот же объектив, поступая на датчик резкости и далее на привод объектива. При этом сигнал от датчика достигает некоторого значения, оптимального для данной САФ. Такие системы позволяют поддерживать наилучшую резкость изображения при изменении расстояния до объекта в процессе его движения, что особенно необходимо для кино- и телекамер. В этих системах сохранение резкости в расчетной плоскости предусматривает анализ изображений в двух плоскостях, расположенных на равном расстоянии от расчетной плоскости. Рассогласование сигналов в плоскостях анализа используют для управления перемещением объектива до восстановления равенства сигналов. Таким образом, в этих системах применяется глубинное сканирование, выполняемое статическим или динамическим способом (сканирование вдоль оптической оси).

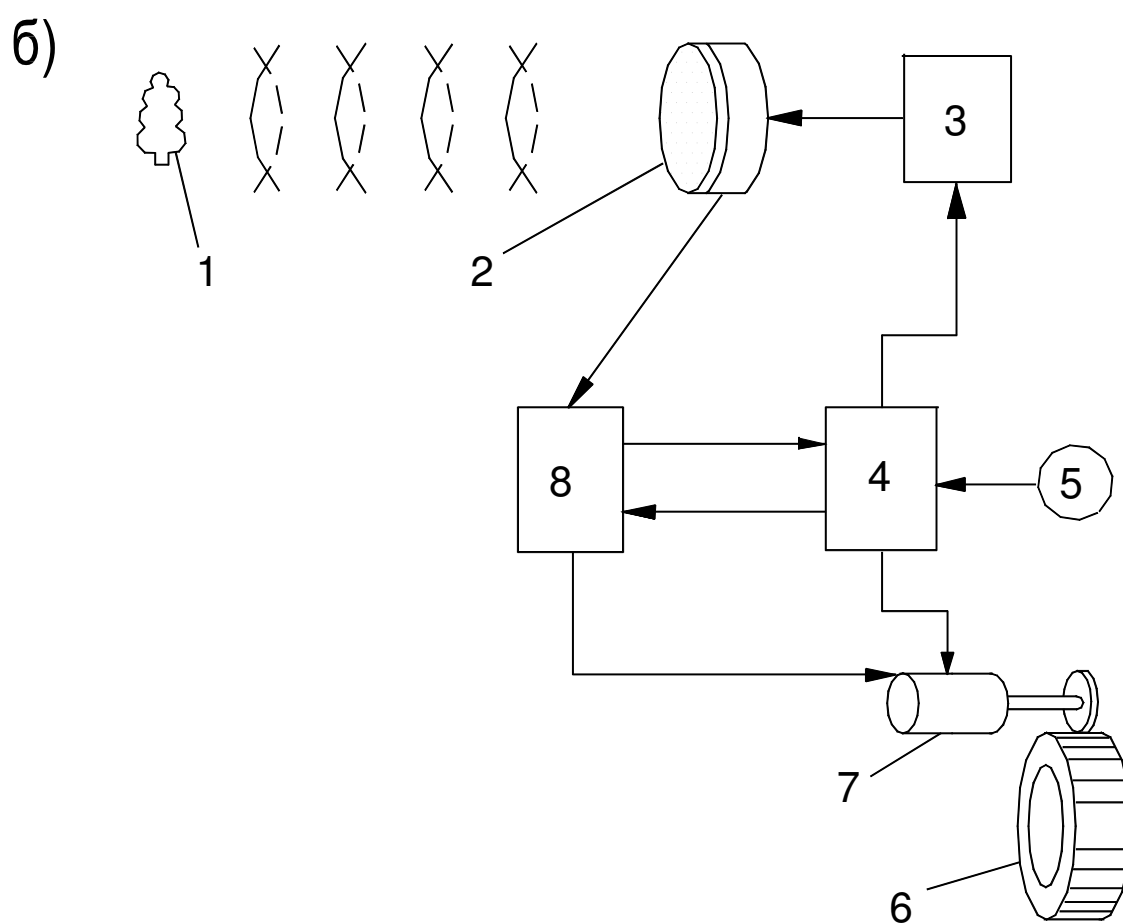
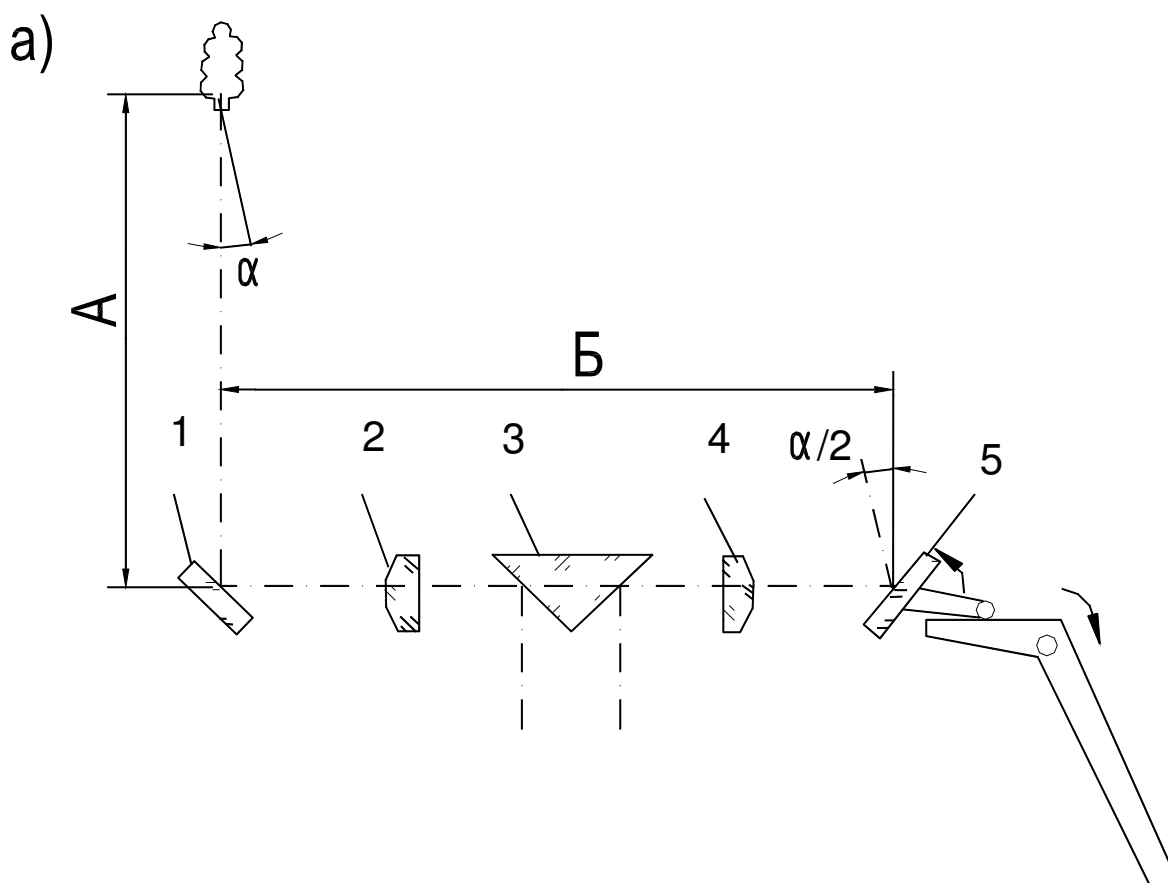


Рис. 5.22. Дальномерные САФ фотоаппаратов

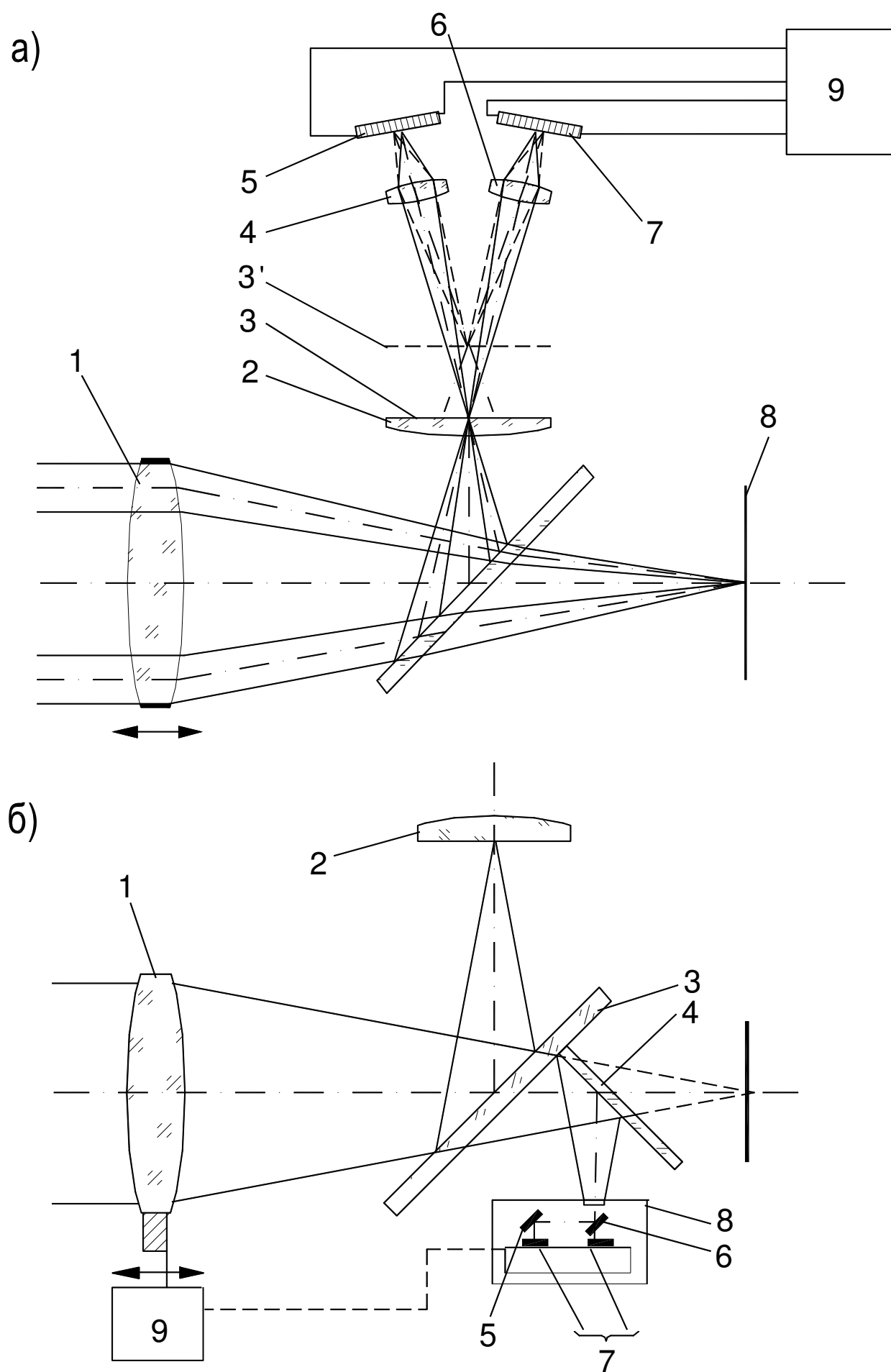


Рис. 5.23. САФ фотоаппаратов с глубинным сканированием

На рис. 5.23а показана оптическая схема САФ с обратной связью. Объектив 1 строит изображение в плоскости фотопленки 8 и плоскости 3, расположенной на плоской поверхности коллективной линзы 2. Объективы 4 и 6 переносят изображение на многоэлементные фотоприемники 5 и 7.

Если изображение расфокусировано и находится в плоскости 3', то точка объекта проектируется объективами 4 и 6 на разные, не совпадающие по положению элементы фотоприемников 5 и 7, что показано штриховыми линиями. Это приводит к рассогласованию сигналов и потребуется осевое перемещение объектива 1 по команде электронной схемы управления 9 до совмещения изображения с плоскостью 3.

На рис. 5.23б приведён другой вариант оптической схемы САФ. Световой поток, прошедший через объектив 1, зеркала 3, 4, 5 и 6 распределяется на два фотоприемника 7 блока 8. Фотоприемники расположены симметрично по разные стороны относительно плоскости резкого изображения. Электрические сигналы фотоприемников сравниваются между собой в блоке 8, который вырабатывает сигнал рассогласования, являющийся управляющим для электродвигателя 9, устанавливающего объектив 1 в зону точной фокусировки.

Кроме глубинного сканирования используется и принцип нулевого контраста, основанный на измерении неравномерности освещения в плоскости выходного зрачка или вблизи плоскости резкого изображения с использованием малой диафрагмы. Этот способ проще метода глубинного сканирования, но обеспечивает меньшую точность.

Оптическая схема (рис.5.24) иллюстрирует этот принцип. На рис. 5.24а объектив 1 имеет фокусирующее перемещение, вспомогательный объектив 2 располагается вблизи задней фокальной плоскости объектива 1, а фотоприемник 3 находится в задней фокальной плоскости объектива 2, т.е. в плоскости выходного зрачка системы из объективов 1 и 2. Если расфокусировки отсутствуют, то объектив 1 создает изображение предмета в плоскости входного зрачка объектива 2. Фотоприёмник 3 при этом освещён наиболее равномерно и в выходном зрачке не видна граница между объектом 4 и фоном 5. При расфокусировках системы (рис. 5.24б и 5.24в) на величину Δ равномерность освещения выходного зрачка нарушается и фотоприемник 3 подает команду на перемещение объектива 1.

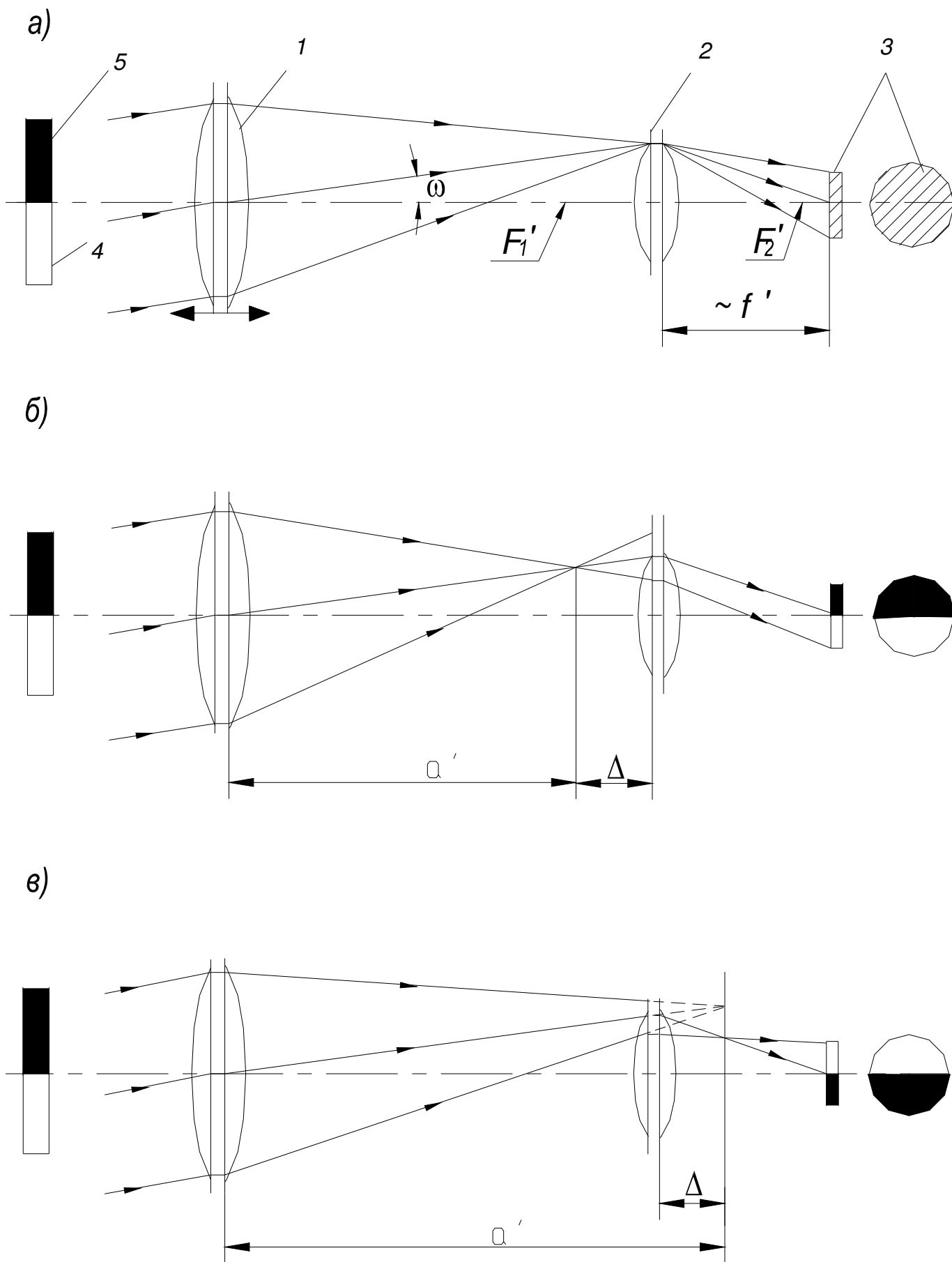


Рис. 5.24. САФ фотоаппаратов с нулевым контрастом

5.5.2. Системы автоматического фокусирования микроскопов

В микроскопах САФ решают две задачи:

- автофокусирование по неподвижным тест-объектам,
- сохранение резкого изображения объекта при его перемещении на микроскопе в плоскости, перпендикулярной к оптической оси.

Бесконтактный контроль диаметра вала при его обработке может осуществлять САФ, выполненная по схеме двойного микроскопа, представленной на рис. 5.25а. Лампа 1 через коллектор 2 освещает диафрагму 3, которая микрообъективом 4 изображается на поверхности вала 5. Отраженный световой поток направляется объективом 6 на фотоприемник 7, соединенный с измерительным прибором 8. Измерительное устройство устанавливается на таком расстоянии относительно вала, чтобы падающий световой пучок точно фокусировался на поверхность вала при достижении требуемого размера. В этот момент сигнал с измерительного прибора 8 окажется максимальным.

На рис. 5.25б приведена оптическая схема автоколлимационной САФ микроскопа. Между лампой 6 и коллектором 4 установлен светоделитель 5, пропускающий свет к диафрагме 3, фокусирующему объективу 2 и к поверхности 1, на которую производится наводка. Отраженный световой пучок светоделителем 5 направляется к фотоприемнику 7.

Применение глубинного сканирования позволяет повысить точность наведения. На рис. 5.26а показана схема САФ, в которой используются два полудиска-решетки 4, вращаемые мотором 2, и один фотозадающий элемент 3. В положении точной фокусировки сигналы для двух половин решеток должны быть равны. При фокусировках знак рассогласования определяется сравнением фаз измерительного и опорного сигналов. Опорный сигнал формируется с помощью 180-градусного сектора на краю полудиска-решетки 4 с помощью лампочки 7, коллектора 6 и фотоприемника 5.

В микроскопе фирмы Лейтц, используемом при изготовлении микросхем, применяется схема (рис. 5.26б), работающая следующим образом. Лучи от лазера 1 зеркалом 2 направляются в микрообъектив 3 и фокусируются на внешней поверхности микросхемы 4. Отраженный от микросхемы 4 луч тем же микрообъективом 3 направляется в щелевой зазор между двумя фотоприемниками 5 и 6. При смещении микросхемы на величину $\pm\Delta$ от номинального положения происходит смещение отраженного луча на верхний или нижний фотоприемники. Сигнал рассогласования, выработанный в блоке 7 направляется в ФМ 8, который и производит необходимое перемещение микросхемы 4. Описанная САФ позволяет сохранять резкое изображение объекта при смене микрообъективов, микросхем и других манипуляциях на приборе.

На рис. 5.26в представлена схема САФ, в которой для глубинного сканирования используется вращающийся полый цилиндр 1, на поверхности которого имеются две щели: узкая и широкая, расположенные

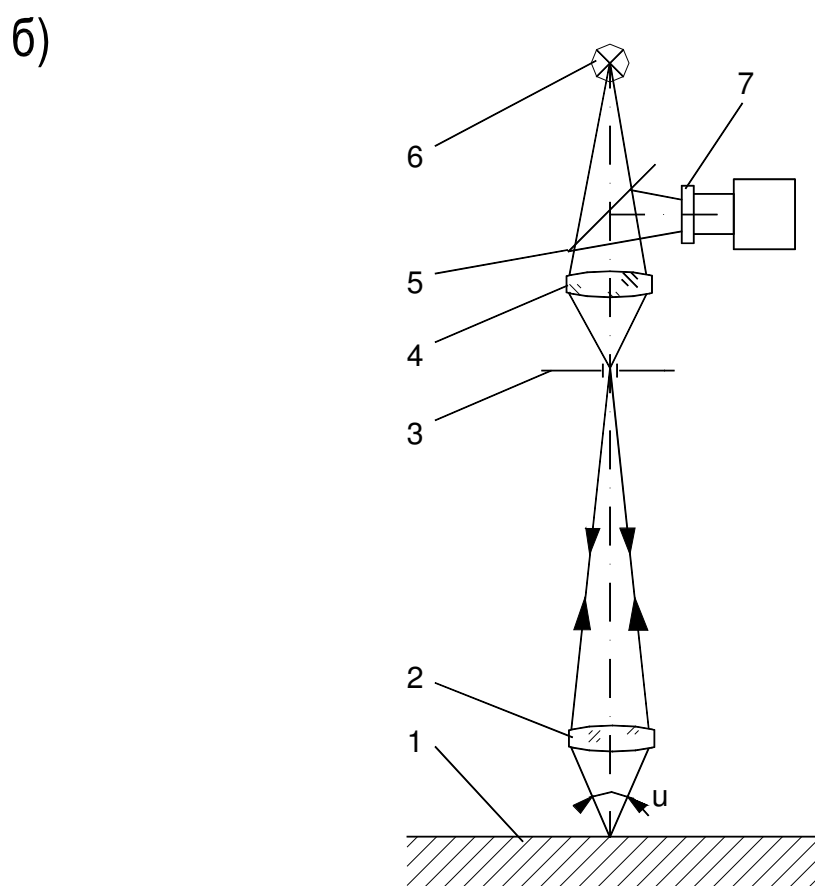
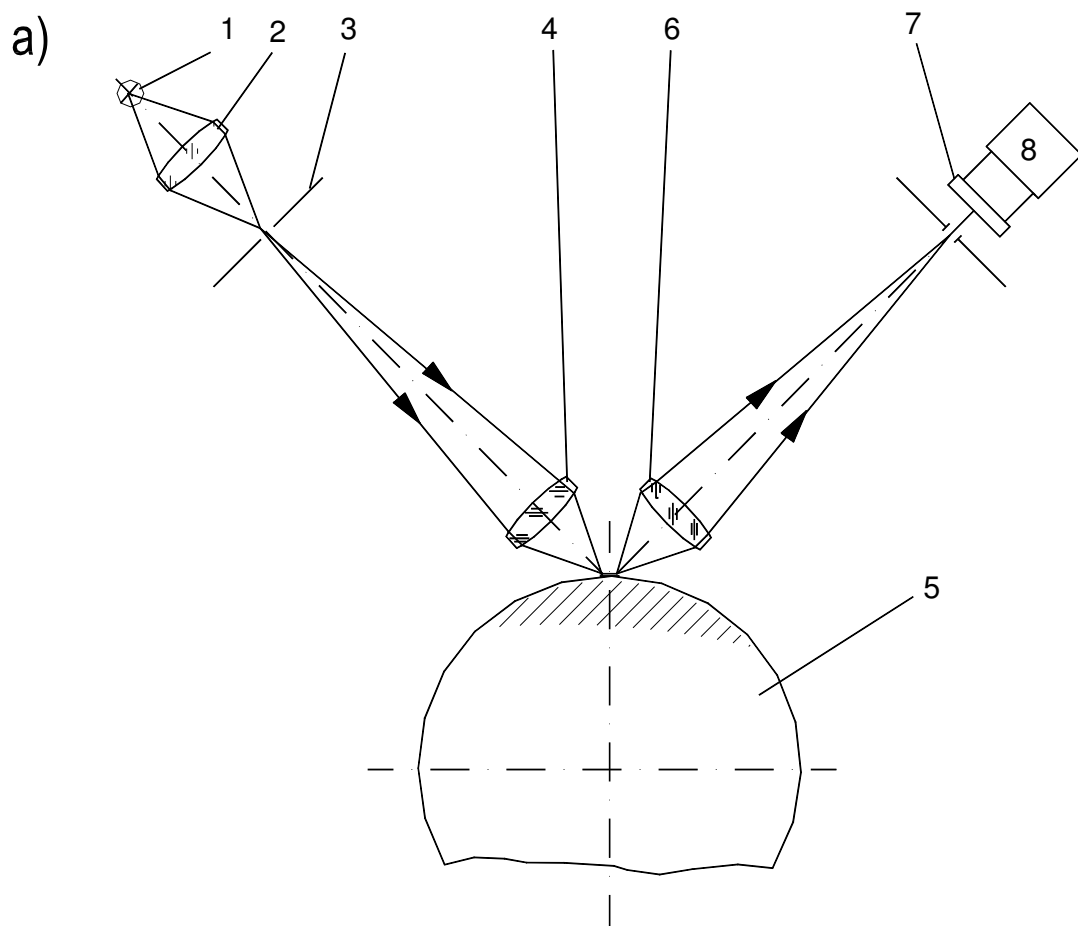


Рис. 5.25. САФ микроскопов

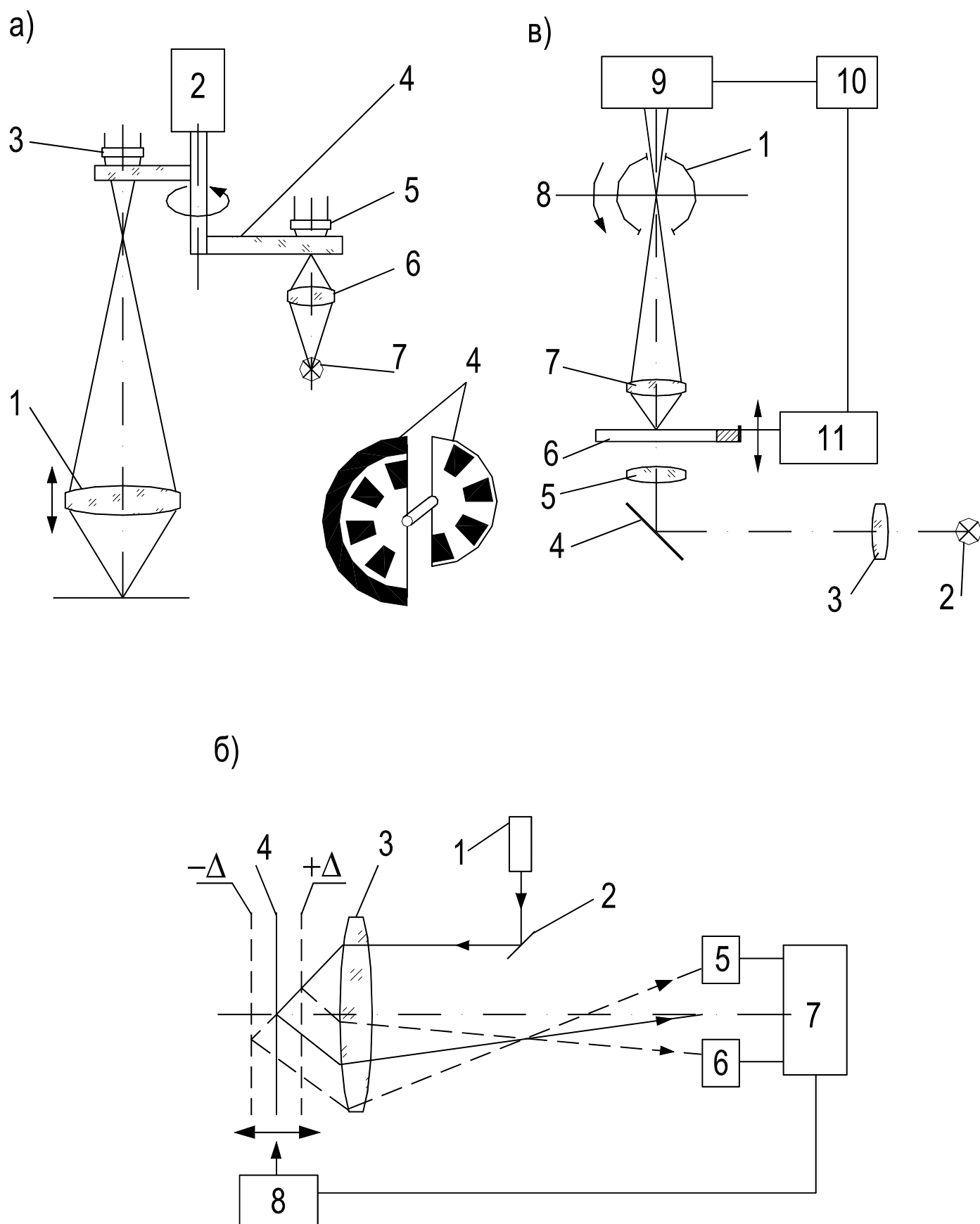


Рис. 5.26. САФ микроскопов с глубинным сканированием

на противоположных сторонах. Ось вращения цилиндра совпадает с плоскостью резкого изображения 8. Лампа 2 через коллектор 3, зеркало 4 и конденсор 5 освещает объект 6. Микрообъектив 7 проектирует изображение объекта в плоскость 8. В идеальном случае при вращении цилиндра 1 на фотоприемник 9 независимо от положения щелей относительно плоскости 8 поступают одинаковые световые потоки. При смещении плоскости 8, вследствие нарушения симметричности конуса лучей относительно оси вращения цилиндра происходит изменение светового потока при разных положениях узкой и широкой щелей. Разностный фотосигнал через блок 10 управляет приводом 11, который производит коррекцию положения объекта 6.

Использование САФ необходимо в компьютерных и лазерных видеопроекторных для устранения осевого биения видеодиска, которое может достигать десятых долей миллиметра. При этом точность фокусировки луча от лазера должна составлять ± 2 мкм.

На рис. 5.27 представлена оптическая схема САФ, в которой излучение лазера 1 с помощью микрообъектива 2 фокусируется на поверхность 3 видеодиска. Отраженные от поверхности лучи проектируются объективами 2 и 6 через светоделитель 5 в плоскость 7, в который располагается фотоприемник из четырех фотодиодов (а, б, в, г). Объектив 6 выполнен в виде бицилиндрической линзы, имеющей два фокуса, разнесенных вдоль оптической оси. При точной фокусировке (поверхность занимает положение II) сечение пучка в плоскости 7 имеет форму круга и все четыре фотодиода освещены одинаково. Если объект занимает положение I или III, круг в плоскости 7 превращается в эллипс, большая ось которого располагается соответственно на фотодиодах а – в и б – г. Вследствие разной освещенности пар диодов возникает разностный сигнал, который с помощью блока 4 и управляет фокусировкой объектива 2.

Рассмотрим подробнее задачу сохранения резкого изображения объекта при его перемещении в плоскости, перпендикулярной к оптической оси.

На рис. 5.28 показан микрообъект 1, имеющий, например, форму трубки переменного сечения, расположенный на предметном стекле 2, которое в свою очередь закреплено на подвижной направляющей 3, перемещающейся по неподвижному основанию 4 предметного столика. Детали могут быть наклонены относительно оптической оси О – О микроскопа на углы $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$. Если наблюдение за объектом ведется при неподвижном столике в пределах поля зрения Д микрообъектива, то автофокусировка с точностью до глубины резкого изображения Т микрообъектива необходима только в том случае, если проходит изменение размера Н. Отклонения этого размера связаны с изменением высоты сменных микрообъективов разного увеличения, температурными или иными деформациями.

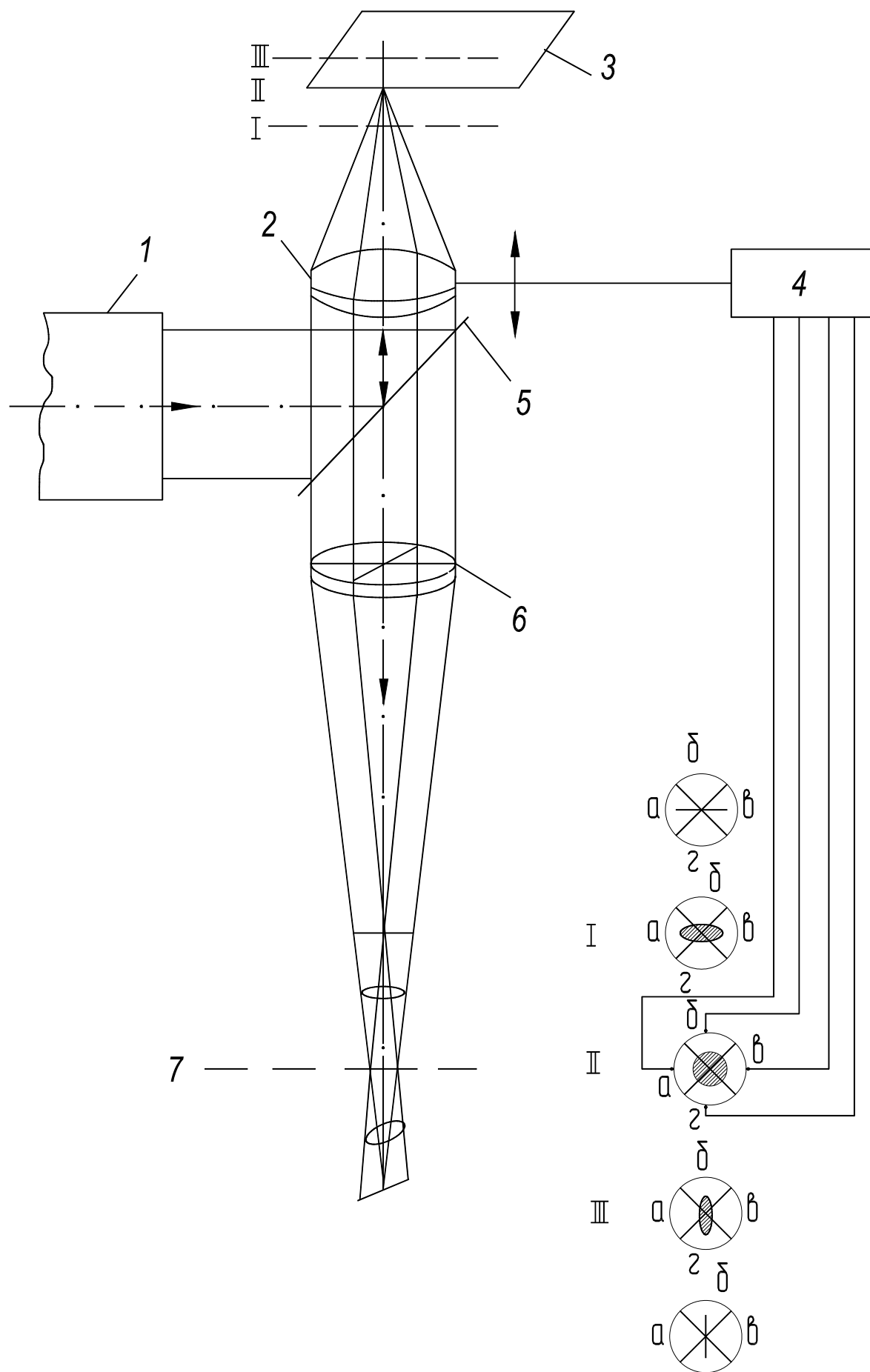


Рис. 5.27. Схема фокусирования видеодиска

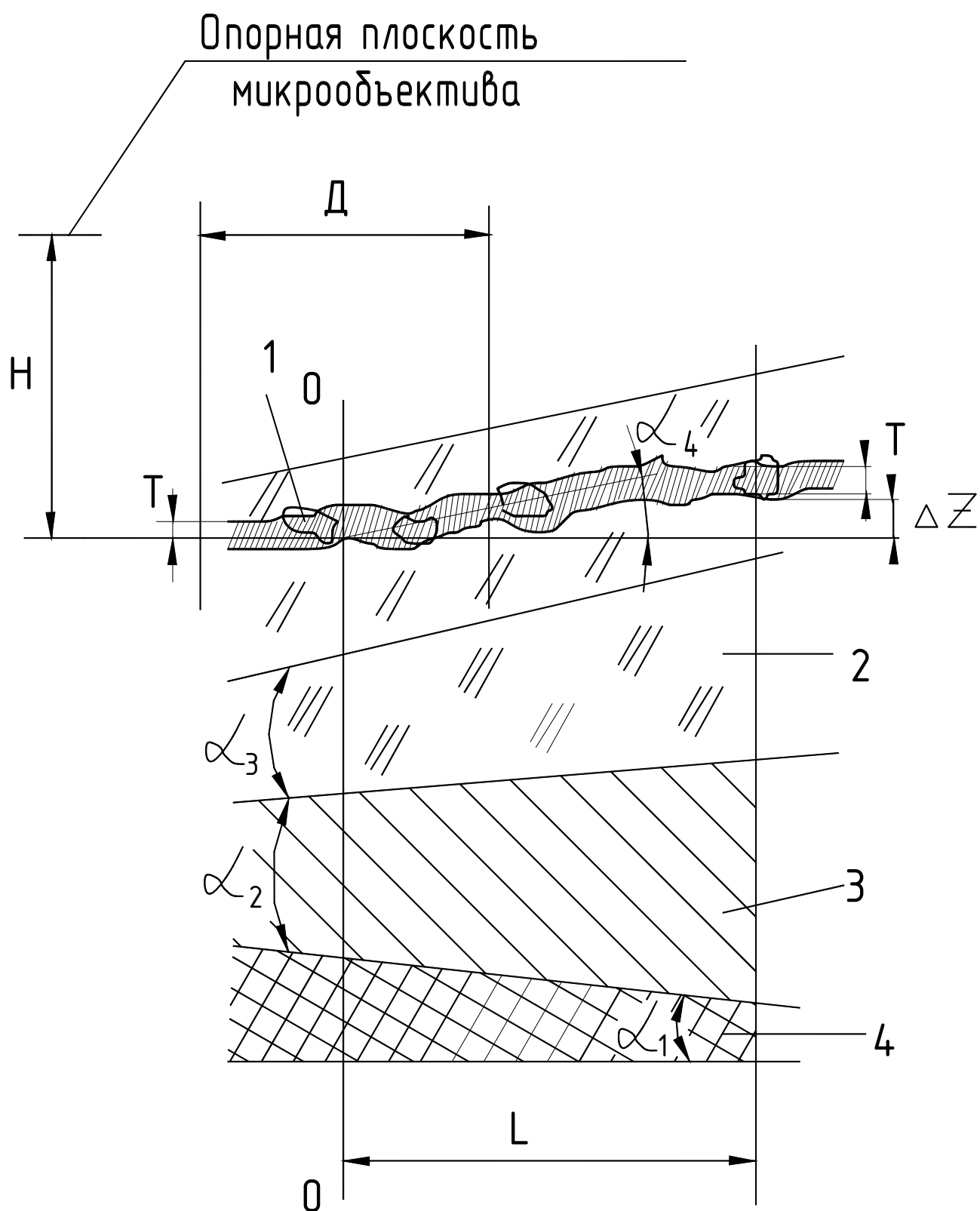


Рис. 5.28. Фокусирование объекта при его перемещении

Однако при просмотре препаратов по площади (например, поиск больных клеток, исследование гистологических срезов, определение геометрических параметров на шлифах металлов и минералов, при контроле микросхем и т.п.) необходимо производить анализ объекта по всей его площади, т.е. перемещать его на величину L . В этом случае при перемещении направляющей 3 вместе с установленным на ней предметным стеклом 2 с микрообъектом 1 происходит расфокусирование на величину ΔZ , определяемую по формуле:

$$\Delta Z = \frac{L \sin(\alpha_2 + \alpha_3)}{\cos(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)} \approx L \sin(\alpha_2 + \alpha_3). \quad (5.23)$$

Вследствие малости углов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ (до $10...15'$) $\cos(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)$ принят равным 1. Из этой формулы следует, что при $L = 10...50$ мм и глубине резкого изображения T иммерсионных объективов равной $0,2 - 0,3$ мкм. суммарный угол $\alpha_2 + \alpha_3$ не должен превышать нескольких секунд, что технологически обеспечить затруднительно. Поэтому необходимо обеспечить постоянное наблюдение за фокусировкой объекта. Особенно актуальна эта задача при автоматизации измерений, когда желательно исключить наблюдателя из процесса или обеспечить условия его работы.

Значительно осложняется задача САФ микроскопов в тех случаях, когда объект имеет вид отдельных зерен, включений и т.п., которые могут быть связаны между собой какими-либо физическими взаимодействиями (например, цепочки из отдельных зерен, которые возникают в толстослойных эмульсиях при воздействии пролетающих элементарных заряженных частиц с веществом фотоэмульсий) или имеют случайное распределение в объеме препарата. В этом случае САФ дополняются системами слежения за объектом при его перемещениях в плоскости, перпендикулярной к оптической оси. При этом требуется выполнение логических операций по распознаванию образа объекта.

5.5.3. Системы автоматического фокусирования других оптических приборов

В диапроекторах, фотоувеличителях и других проекционных приборах положение фотопленки при ее смене и вследствие различных деформаций изменяется. Поэтому компенсация нарушений резкости производится с помощью САФ.

В оптической схеме фотоувеличителя (рис. 5.29а) часть потока от вспомогательной лампы 2, выделенная инфракрасным светофильтром, проектируется линзами 4 и 6 на плоскость кадра 3. Отраженный от пленки пучок фокусируется объективом 7 в плоскость расположения двух фотоприемников 5, в узкую щель между ними. Если имеет место

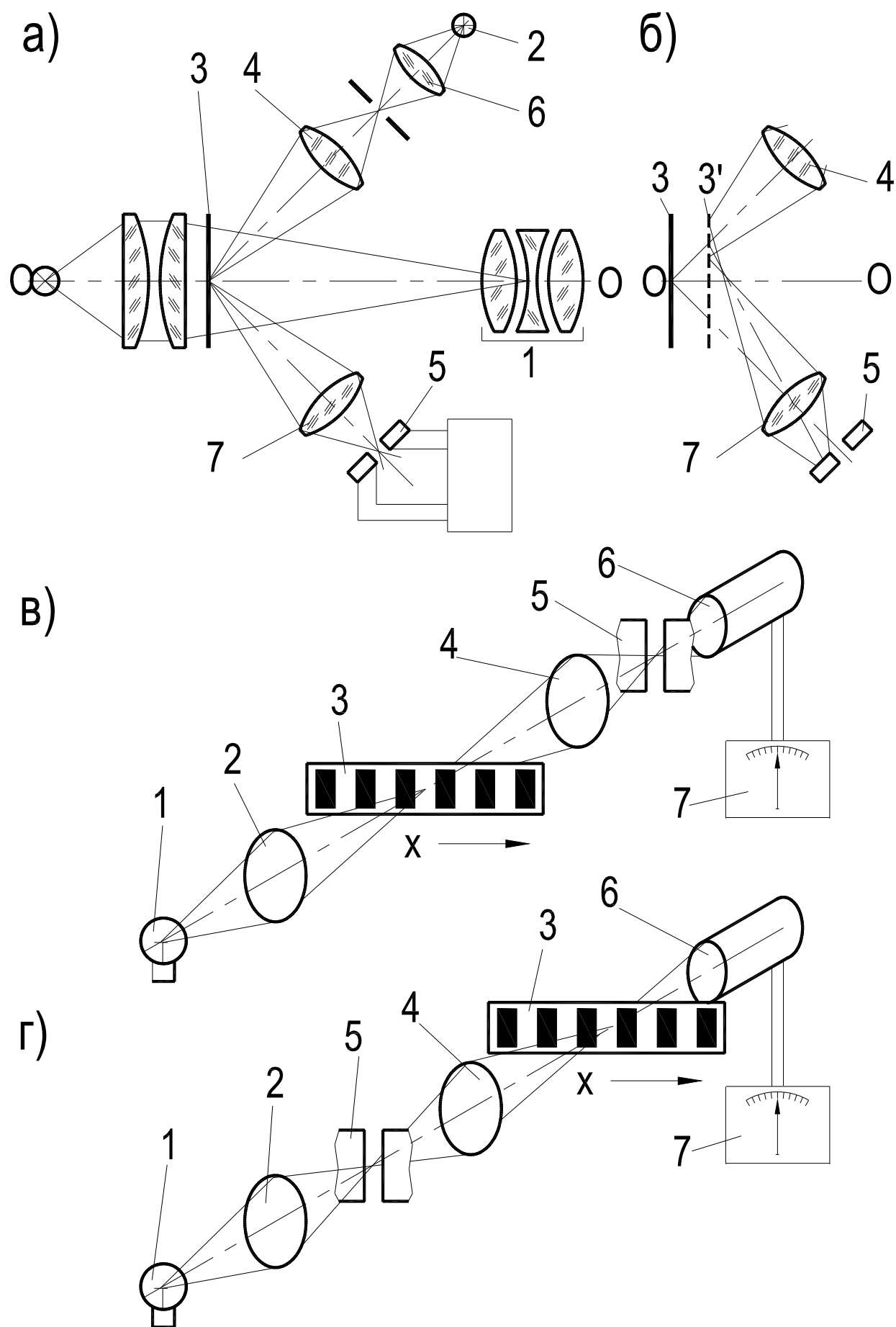


Рис. 5.29. САФ фотоувеличителя и КИП

расфокусировка кадра 3 (рис. 5.29б), то отраженный пучок освещает один из фотоприемников больше, чем другой. Сигнал рассогласования используется для смещения рамки с пленкой. Исходная резкость на экране устанавливается вручную перемещением объектива 1.

При испытаниях оптических систем, главным образом объективов (измерение рабочих отрезков, заднего фокусного расстояния, хроматизма положения и т.д.), часто в контрольном оборудовании используется САФ и тест-объекты в виде периодических решеток-мир, узких щелей, краев полуплоскостей и т.п. В контрольных устройствах для автоматической установки лучшего изображения может быть использовано измерение коэффициента передачи модуляции. Для этого необходимо измерить модуляцию в изображении синусоидальной миры и модуляцию в самой мире. Их отношение и определяют коэффициент передачи модуляции $T(N)$, равный

$$T(N) = \frac{(J'_{\max} - J'_{\min}) / (J'_{\max} + J'_{\min})}{(J_{\max} - J_{\min}) / (J_{\max} + J_{\min})}, \quad (5.24)$$

где J и J' – интенсивности соответственно тест-объекта и его изображения.

Варианты схем измерения интенсивностей показаны на рис. 5.29в и 5.29г. Источник света 1 через коллектор 2 освещает тест-объект 3 (см. рис. 5.29в). После фокусируемой исследуемой оптической системы 4 располагается щель 5, фотоприемник 6 и отсчетный прибор 7. Во втором варианте (см. рис. 5.29г) синусоидальная мира 3 и щель 5 поменялись местами по ходу лучей. При максимальном значении коэффициента передачи модуляции объектив 4 установлен на резкое изображение.

5.5.4. Системы автоматической фокусировки адаптивной оптики

Автоматическое фокусирование используется в адаптивной оптике для устранения нерегулярных искажений волнового фронта. Искажения возникают вследствие неоднородности среды (например, турбулентности атмосферы), за счёт деформации деталей, возникающей при колебаниях температуры, при изменении центра тяжести деталей и узлов, при вибрациях и других воздействиях. В зависимости от условий эксплуатации прибора (в атмосфере, под водой, в космосе и т.п.) превалируют те или иные искажения.

Устройства, изменяющие форму волнового фронта, называются корректорами. Их разделяют на две группы. К первой группе относятся гибкие и сегментированные зеркала с пьезоэлектрическими, магнитострикционными или другими типами приводов, имеющие

сравнительно небольшое число управляющих воздействий. Ко второй группе относятся пространственные модуляторы света (управляемые транспаранты), выполненные в виде пленок с деформируемой поверхностью, жидкокристаллических транспарантов, на основе электрооптического эффекта Поккельса и др.

На рис. 5.30а приведена оптическая схема САФ, позволяющая компенсировать искажения волнового фронта, вносимые средой. В этой схеме излучение лазера 1 необходимо сфокусировать на точечный объект 4 через искажающую среду 3. Плоская волна, выходящая из лазера 1 (источника), преобразуется с помощью корректора 2 таким образом, чтобы после прохождения через искаженную среду 3 излучение сфокусировалось на точечном объекте 4. Рассеянное поле после возвращения через среду 3 принимается датчиком 5 и в регуляторе 6 формируются сигналы управления корректором.

Для коррекции формы поверхности зеркала крупного телескопа предложена схема (рис. 5.30б), в которой главное составное зеркало 1 и деформируемое зеркало 2 имеют систему приводов 6 и 7. Привод 7 главного зеркала компенсирует дефекты его формы и устраняет медленные возмущения, например, тепловые деформации. Привод 6 зеркала 2 компенсирует быстрые изменения волнового фронта. Управление приводами осуществляется от датчика изображения 3 и датчика волнового фронта 4 через ЭВМ 5.

Схема компенсации тепловых флуктуаций в двухплечевом интерферометре Майкельсона, предназначенном для регистрации вибраций, показана на рис. 5.30в. Одна часть светового пучка от лазера 1 через светоделитель 2 отклоняется на опорное зеркало 3 с пьезоприводом и отражается обратно, а часть пучка попадает на вибрирующее зеркало 4 и также отражается назад. Фотоприемник D реагирует на освещенность интерференционной картины, образовавшейся на светоделителе 2. Полученная интерференционная картина претерпевает высокочастотные колебания, связанные с вибрацией зеркала 4 и низкочастотные, возникающие за счёт теплового дрейфа элементов конструкции. Усилитель 5 и фильтр 7 выделяют низкочастотную и высокочастотную составляющую информационного сигнала. При этом низкочастотный сигнал, соответствующий тепловым смещениям, через устройство управления 6 управляет пьезоприводом зеркала 3, исключая таким образом дрейф разности плеч интерферометра.

Рассмотрим типичные корректоры ВФ (волнового фронта), наиболее распространенные в настоящее время, – деформируемые зеркала с электростатическим управлением.

Привод является основным элементом управляемых зеркал, в котором используют пьезокерамику типа ЦТС–19. Пьезопривод действует по следующему принципу. К пьезоэлементу (рис. 5.31) параллельно вектору остаточной поляризации P_0 , прикладывается электрическое поле.

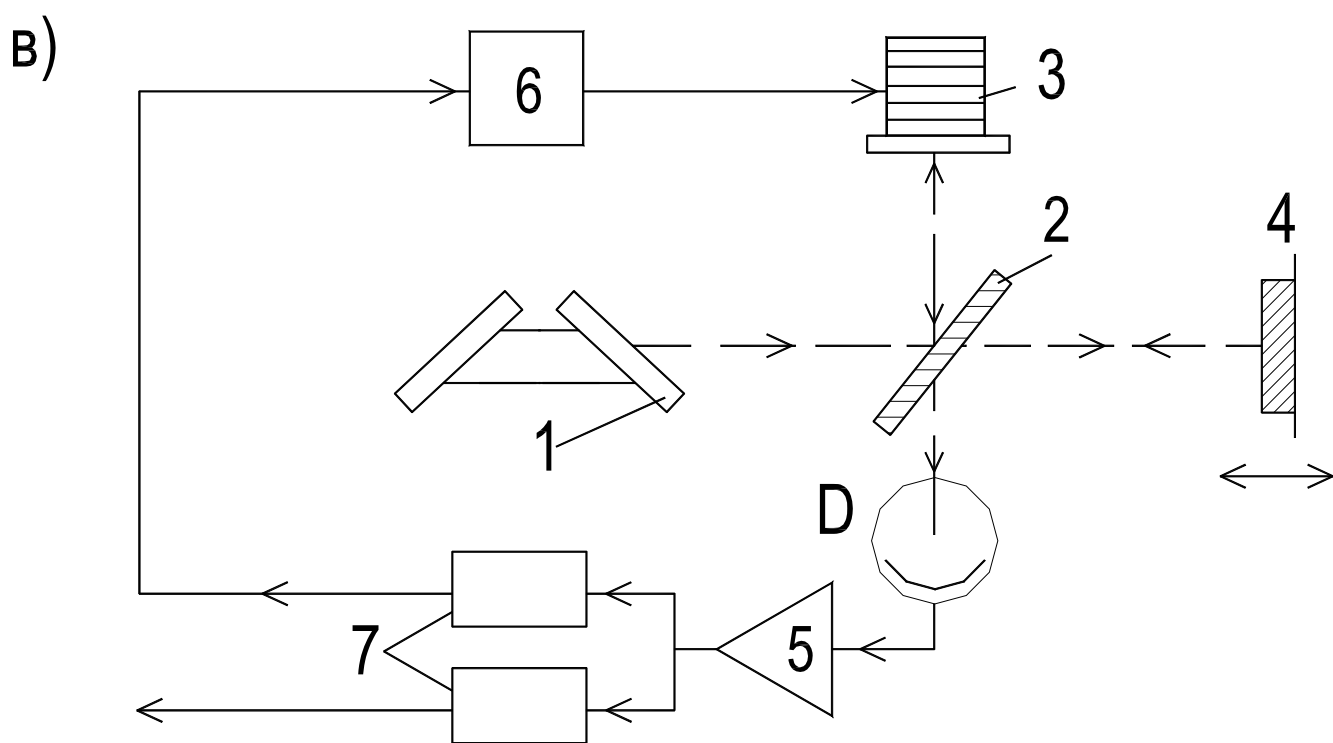
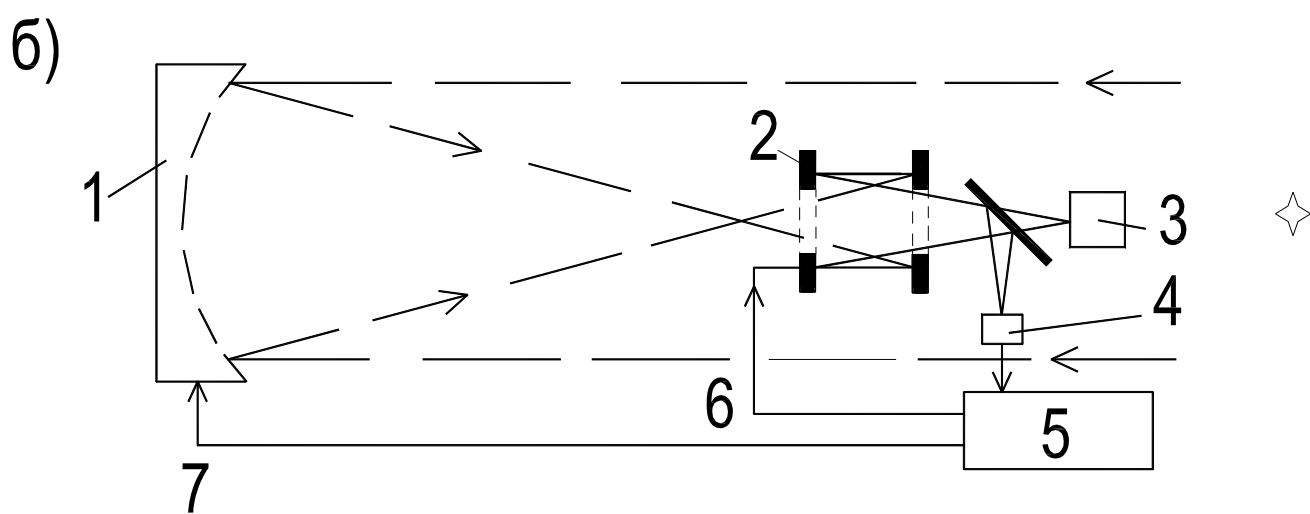
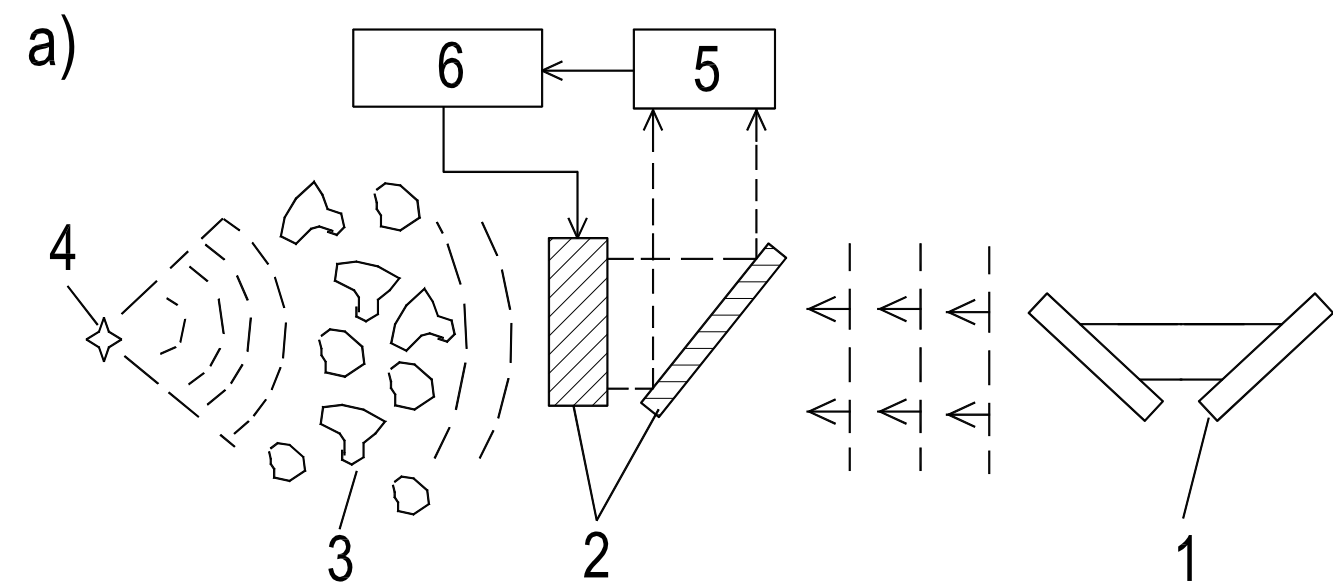


Рис. 5.30. САФ адаптивной оптики и КИП

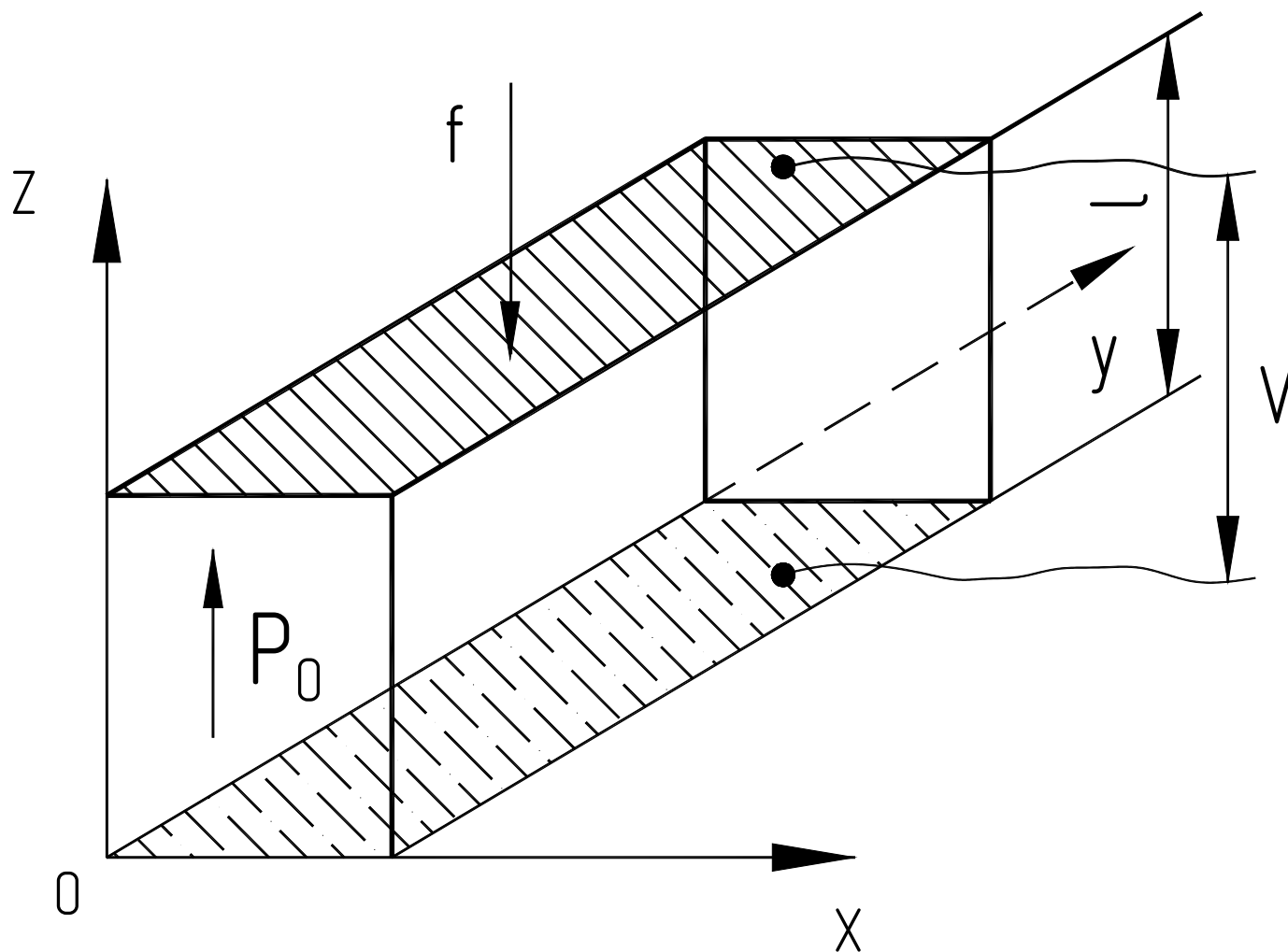


Рис. 5.31. Пьезоэлемент

Под действием этого поля изменяются размеры элемента. Изменение размера элемента вдоль оси Z параллельной вектору P_0 называется продольным пьезоэффектом, а изменение размера вдоль осей X и Y – поперечным. Удлинение Δl вдоль любой оси равно

$$\Delta l = dEl = dU, \quad (5.25)$$

где d – пьезомодуль (для керамики ЦТС–19 $d = 3,6 \times 10^{-10}$ м/в),
 E – напряженность управляющего поля ($E=U/l$),
 l – длина пьезоэлемента,
 U – приложенное напряжение.

Если на пьезоэлемент действует нагрузка P (вес зеркала, усилие, возникающее при деформации зеркала, и т.п.), то удлинение пьезоэлемента будет определяться формулой

$$\Delta l = dU - P/k, \quad (5.26)$$

где $K = SG/l$ – жесткость элемента,
 S – площадь поперечного сечения пьезоэлемента,
 G – модуль Юнга (для ЦТС–19 $G = 0,72 \times 10^{11}$ Па).

Максимальное перемещение $\Delta l_{\max}$ при максимальной напряженности поля E_c пропорционально длине образца l и равно

$$\Delta l_{\max} = l d E_c . \quad (5.27)$$

При $E_c = 10^6$ В/м получим $\Delta l = 3,6 \times 10^{-4}$. Таким образом, для перемещения ± 1 мкм. необходим пьезоэлемент толщиной 3 мм и управляющее напряжение 3 кВ. Для снижения напряжения применяют составные пьезопакеты, склеенные из многих пластин (рис. 5.32а). В этом случае

$$\Delta l = n d U , \quad (5.28)$$

где n – число пластин в пакете.

Для повышения чувствительности привода используют поперечный пьезоэффект (рис. 5.32б). В этом случае удлинение пьезоэлемента определяются формулой

$$\Delta l = d n l \frac{V}{h} - \frac{P}{K} \quad (5.29)$$

где $d n$ – пьезоэлектрический модуль в поперечном направлении,
 h – толщина пьезоэлемента.

Хотя модуль $d n$ (для керамики ЦТС–19 равен $1,7 \times 10^{-10}$ м/в) в два раза меньше, чем модуль в продольном направлении d , выигрыш в величине Δl достигается за счет большей величины отношения l/h . Так, при $h = 0,5$ мм. и $l = 30$ мм. величину удлинения пьезоэлемента Δl можно повысить в 30 раз. Пьезоэлементы с поперечным эффектом часто выполняют в виде полых тонкостенных цилиндров (рис. 5.32в). При подаче потенциалов на внутреннюю и внешнюю обкладки цилиндра пьезоэлемент удлиняется за счет поперечного пьезоэффекта.

Еще больший выигрыш в чувствительности может быть достигнут при использовании биморфных пьезоэлементов в виде консольных пластин или дисков.

Рассмотренные пьезоэлементы используются для перемещения отражающих поверхностей в сегментированных, независимых, жестких зеркалах, образующих составное зеркало. Разработаны и деформируемые

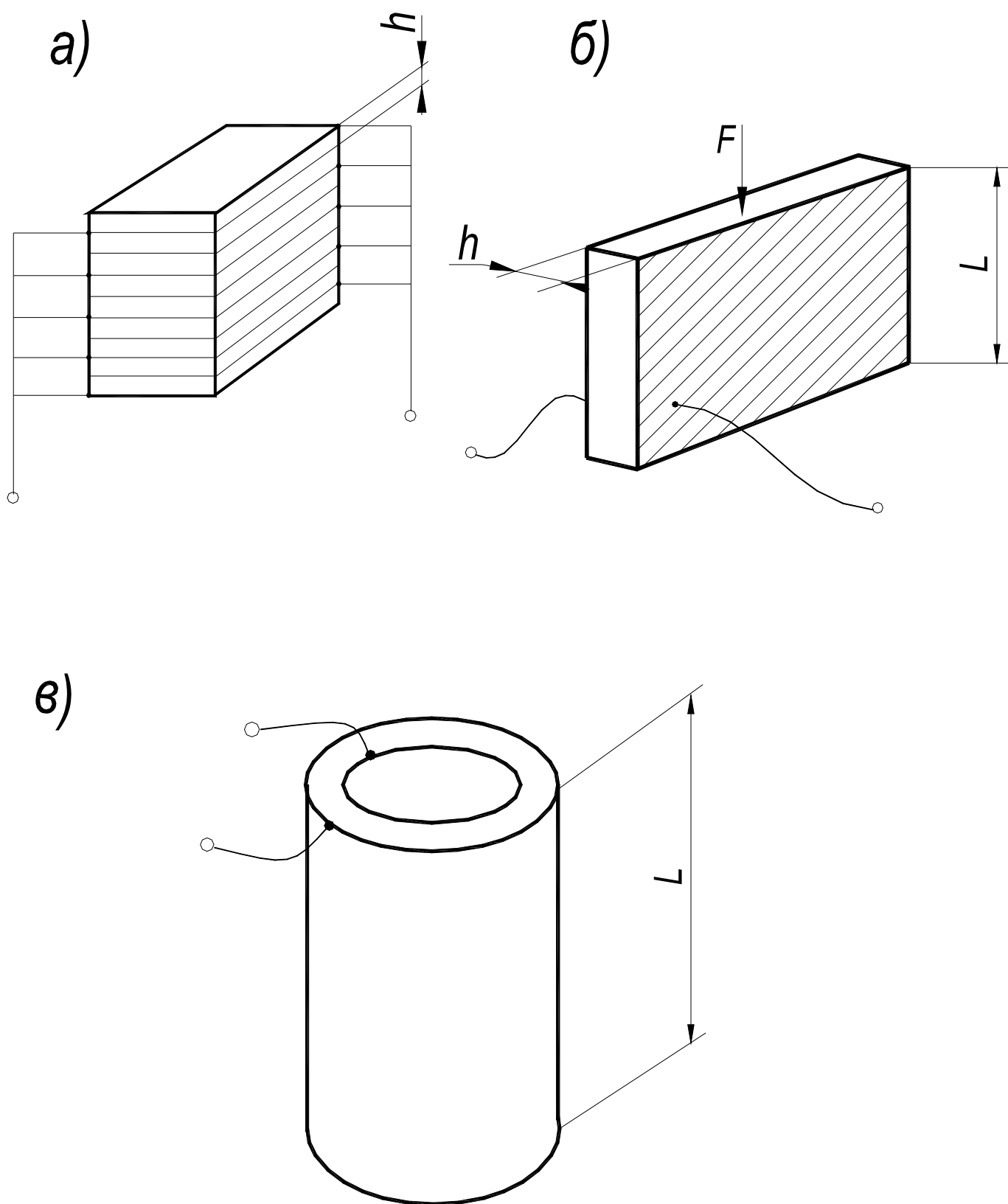


Рис. 5.32. Варианты пьезоэлементов

зеркала (рис. 5.33а), содержащие гибкую пластину 1, на которой нанесено отражающее покрытие 4. Деформация пьезокерамики 2 происходит при подаче напряжения на электроды 3. На рис. 5.33б и 5.33в показаны варианты расположения управляющих электродов.

Существует и монолитное пьезоэлектрическое зеркало (рис. 5.33г), в котором стеклянное зеркало 1 склеено с керамическим блоком 3. На верхнюю поверхность пьезокерамики наклеены электроды 2 (рис. 5.33д), имеющие выводы 5. Общий электрод 4 расположен на нижней стороне керамики.

5.5.5. Системы автоматической фокусировки систем машинного видения

Системы машинного видения (СМВ) используются для обнаружения объектов, их идентификации, определения координат и других параметров с помощью ЭВМ.

Областями применения СМВ являются визуальный контроль качества продукции (проверка формы, размеров, качества обработки поверхности, контроль поточных текстильных линий и т.п.), управление производственными процессами (монтажом и сборкой, сваркой и т.п.), использование в качестве зрения роботов, транспортных устройств (например, при обходе препятствий), контроль электронных микросхем и т.п. В качестве приемников сигнала, реализующих процесс считывания изображения, применяют телевизионные трубки, приборы зарядовой связи (ПЗС) и приборы зарядовой инжекции (ПЗИ). В них используются распространенные методы разложения изображений. СМВ используются для анализа двумерных (плоских) изображений и для анализа изображений трёхмерных сцен. Наиболее сложна проблема автоматического анализа трехмерных сцен. Для определения координаты Z , направленной вдоль оптической оси, используются методы триангуляции, стереоскопии, структурированного освещения и др.

При методе структурированного освещения используются световые пучки различной формы в виде колец, полос, решеток и т.п. Измеряя деформацию линий подсветки на объекте, получают информацию о трехмерной конфигурации поверхности.

На рис. 5.34 представлена схема одного из вариантов триангуляционного метода контроля поверхности. Измерительная головка, состоящая из лазера 2 и видеодатчика 1, сканирует измеряемый объект 4. При этом лазерный луч, отражаясь от объекта, линзой 3 проектируется на видеодатчик.

Рассмотрим способ определения координаты Z . Используя обозначения, приведённые на рис. 5.34, можно составить соотношение

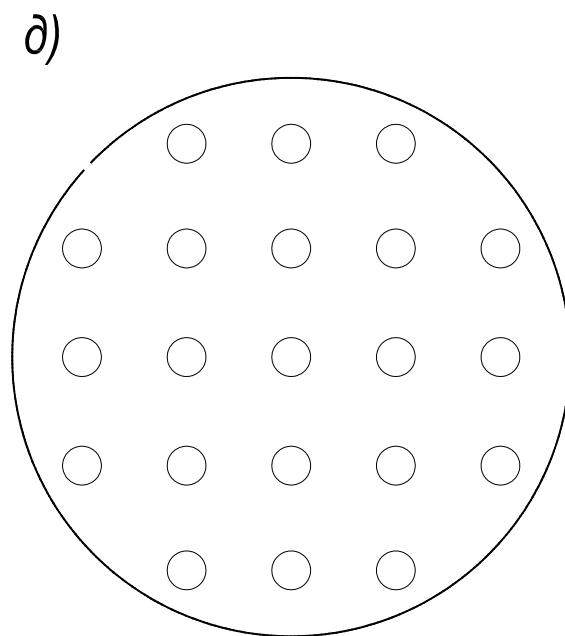
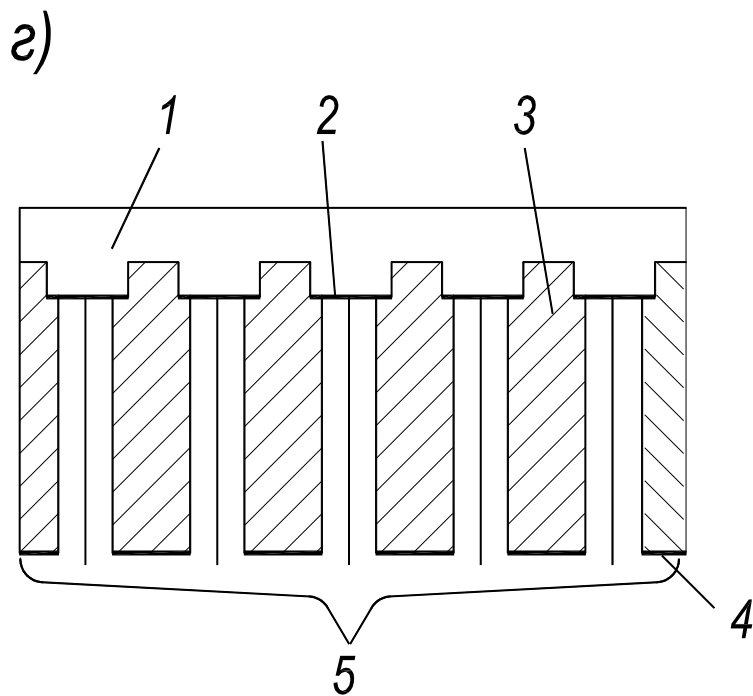
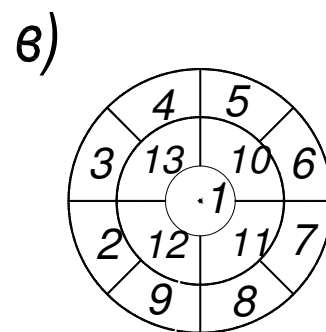
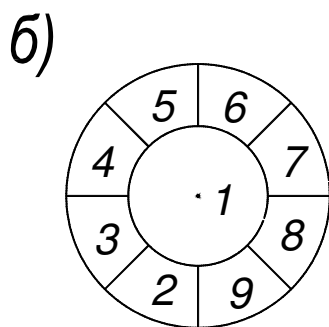
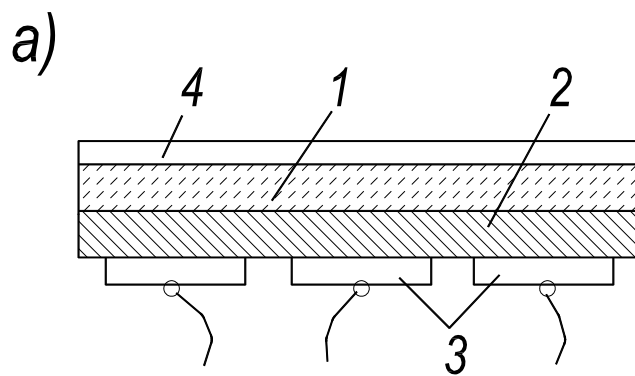


Рис. 5.33. Зеркала с пьезоприводом



где f – фокусное расстояние линзы,
 N_s – положение пятна на видеодатчике,
 N_o – положение исходной точки оптической оси,
 φ – угол обзора видеодатчика.

Расстояние от пятна лазерного луча до опорной поверхности Z равно

$$Z = Z_o - Z_d . \quad (5.30)$$

Таким образом, зная координаты X и Y лазерного луча и определив

координату Z , можно построить пространственную форму объекта. Для анализа трехмерных сцен находят применение стереотелевизионные анализаторы, фотоэлектрические матрицы и т.п. Рассмотрим ход лучей в стереоанализаторе (рис. 5.35), когда оптические оси камер 1 параллельны и расположены на расстоянии S . Обозначения параметров формул (5.31) приведены на рис. 5.35.

Из подобных треугольников получаем

$$d/f = L/CX = (L+S)/(C'X') \text{ или } d = Sf/\beta, \quad (5.31)$$

где $\beta = C'X' - CX$.

Отрезок β называется стереоскопическим несоответствием. Точность измерения d определяется интервалом деления изображения на элементы.

Точность существующих стереоанализаторов достаточна для целей передвижения мобильных роботов во внешней среде и распознавания препятствий, но недостаточна для высокоточной сборки.

Рис. 5.36а иллюстрирует метод структурированной подсветки, применяемый для анализа трехмерных объектов. В корпусе 1 установлен источник щелевой подсветки 2, видеоанализатор 3 и зеркало 4. Движущийся объект 5 сканируется световой линией шириной 1...3 мм. При движении конвейера с объектом 5 видеоанализатором 3 формируется ряд последовательных сечений объекта (рис. 5.36б), из которых синтезируется образ объекта, идентифицируемый, затем с помощью микропроцессора. Производительность таких систем около 2000 деталей в минуту.

Кроме рассмотренных выше принципов действия анализаторов трехмерных объектов и сцен используются и другие. Например, лазерные дальнометрические сканирующие анализаторы, использующие принцип изменения времени прохождения сигнала или измерение изменения фазы, волоконно-оптические устройства и другие.

5.6. Стабильность фокусируемых механизмов

В процессе фокусирования с помощью световых лучей происходит взаимодействие между объектом и оптической системой. Поэтому одно из основных требований к ФМ состоит в том, чтобы стабильность их взаимного расположения в пространстве и во времени была максимальной.

Стабильность ФМ зависит от статических и динамических условий работы ОП, скорости протекания процессов и может иметь обратимый и необратимый характер. К числу быстро протекающих процессов, измеряемых долями секунд, относятся вибрации, изменения нагрузок и силы трения в подвижных соединениях и др. Со средней скоростью в течение минут и часов происходят температурные процессы и деформации ими вызываемые. Медленно протекающие процессы продолжаются

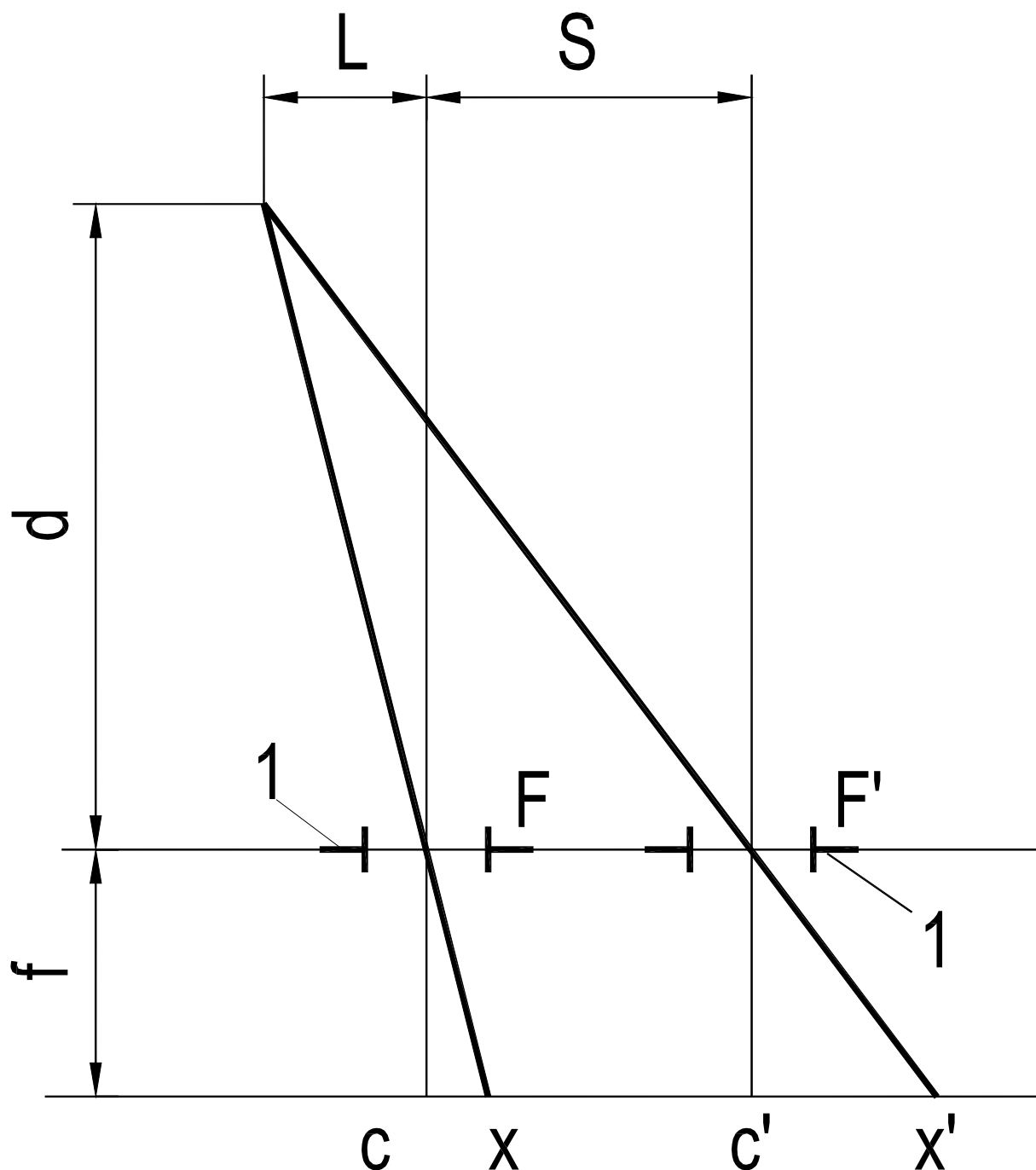


Рис. 5.35. Измерение координат на стереоанализаторе

месяцами и включают в себя износ направляющих, перераспределение внутренних напряжений в деталях, загустение смазки и т.п. Для оценки стабильности ФМ используют критерии точности, жесткости, виброустойчивости, теплоустойчивости, износоустойчивости и другие. В общем виде многие из них изложены в гл. 2.

Точность относится к числу обобщенных критериев стабильности ФМ и определяет параметры функционирования ОП, базирования и т.д.

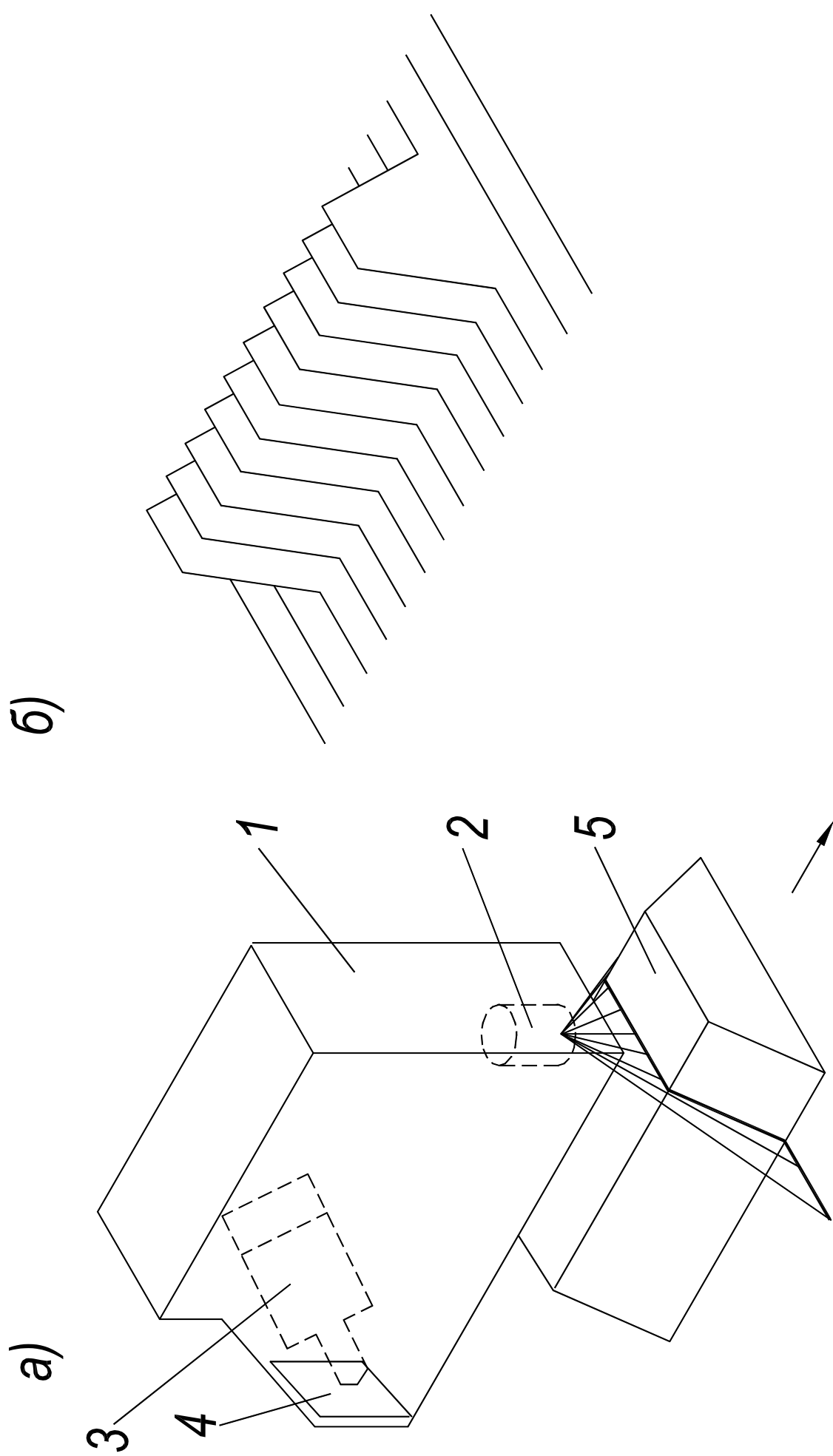


Рис. 5.36. Структурированное освещение

Качество функционирования интерференционных приборов оценивается контрастом интерференционной картины.

Из практики известно, что при визуальных интерференционных измерениях разность хода не должна превышать $0,1\lambda$, т.е. точность функционирования интерференционных и голографических приборов составляет для видимой части спектра $0,05...0,1$ мкм. При использовании фазовой модуляции погрешность отсчета по оси Z может достигать 3 – 5 нм. При фото, киносъемке и других способах фиксации изображения точность функционирования по трем координатам, определенная исходя из разрешающей способности фотоносителя, проекционных объективов и допустимого кружка рассеяния, составит $0,02...0,05$ мм.

Для микроскопов точность функционирования также определяется тремя координатами и зависит от вида выполняемой работы. Смещение системы “объект-объектив” по осям X и Y допускается не более: при визуальном наблюдении – 0,03 мм; при фотографировании – 0,02 мм; при линейных измерениях на пределе различения – 0,02 мкм; при фотометрировании – 0,5 мкм. Смещения по оси Z, исходя из глубины резкости, не более $0,2...0,4$ мкм.

Точность функционирования контрольно-измерительных, спектральных и других приборов, телескопов и зрительных труб определяется особенностями их функциональных схем, конструкции, назначения и составляет от сотых долей миллиметра до сотых долей микрометра.

Сохранение стабильности ОП и его ФМ связано со способностью конструкции сопротивляться появлению деформаций. Деформации, возникающие в ФМ, имеют упругий и остаточный характер. Упругие деформации δ_u исчезают после снятия нагрузки, а остаточные дост. сохраняются. Способность конструкции препятствовать появлению деформации под действием нагрузки P называется жёсткостью конструкции, которая для сложного механизма определяется следующей формулой

$$C = \frac{1}{\delta} P, \quad (5.32)$$

где δ – деформация механизма в направлении действия силы, мм.

Сложный механизм рассматривается как упругое тело, которое подчиняется действию закона Гука. Определим по формуле (5.32) оптимальную жёсткость конструкции ФМ для различных ОП, исходя из следующих предположений:

– величина допустимых деформаций, действующих на ФМ, равна $1/4...1/2$ величины точности ОП, приведённой ранее;

– колебания и усилия, действующие на ФМ, не превышают 10Н.

Результаты расчётов показали, что жёсткость конструкции ФМ:

- у интерферометров и голографических приборов – 100000 Н/мм;
- у приборов для фиксации изображения – не менее 200 Н/мм;
- у световых микроскопов по осям X и Y при визуальном наблюдении – не менее 300 Н/мм, по осям X и Y при фотографировании и измерениях – не менее 50000 Н/мм, по оси Z – 50000 Н/мм.

Для других ОП значение жесткости определяется аналогичным образом.

Исследование жесткости конструкции ФМ состоит в измерении смещений конструкции при приложении к ней нагрузок. Для измерения смещений используют стрелочные приборы, различные датчики, ОП для линейных измерений, фотографические и тензометрические приборы. Нагрузки создаются с помощью динамометров или гирь. Смещения измеряются в направлении действия сил или по координатным осям.

По результатам измерения деформаций при нагружении и разгрузке строят кривые, которые в общем случае образуют гистерезисную петлю. Площадь гистерезисной петли характеризует работу сил трения, затраты энергии на деформацию смазочных слоев, микронеровности и т.п. в сопряжениях механизма. Величина упругих смещений обычно значительно превышает величину остаточных смещений.

Рассмотрим результаты измерения жесткости для ФМ микроскопов. При исследовании ФМ микроскопов, измерение смещений достаточно просто, поскольку сам микроскоп может быть использован как измерительное устройство. С этой целью на него устанавливают винтовой окулярный микрометр, объектив $10^{\times}$ или $20^{\times}$. На столик устанавливается объект-микрометр, представляющий стеклянную шкалу с делениями, нанесенными через 0,01 мм. При таких объективах цена деления окулярного микрометра составит 1 и 0,5 мкм. При приложении усилий к системе “объект – объектив” происходит смещение объект-микрометра или объектива относительно шкалы окулярного микрометра, которое и измеряется.

На рис. 2.9 приведены результаты измерений смещений ФМ микроскопов по осям X, Y, Z.

Результаты измерений жёсткости ФМ разных конструкции приведены в табл. 5.1. Здесь же даны и измерения жесткости роликовых направляющих, конструкция которых изображена на рис. 4.8а.

Из данных таблицы следует:

- жесткость по оси X большинства ФМ, особенно имеющих консольное расположение оптической оси относительно опорной плоскости, не соответствует оптимальной жесткости, особенно для повышенных требований; наибольшую жесткость имеют ФМ с роликовыми направляющими, в которых оптическая и механическая оси совпадают;

– остаточные деформации направляющих с трением качения не превышают 2...5 мкм. и обеспечивают необходимое сохранение центровки системы “объект-объектив”;

– при конструировании органов управления и приводных механизмов необходимо с помощью круговых диаграмм устанавливать направления максимальной жесткости и совмещать с ними направление усилий, действующих на ФМ.

Таблица 5.1

Конструктивные особенности	Жесткость С, Н/мм и остаточные смещения, мкм					
	C _x	C _y	C _z	δ _{xo}	δ _{yo}	δ _{zo}
Подвижный тубусодержатель. Две направляющих скольжения. Рис. 2.9а у = 95; L=25	±180 28	±1470 300	280	±30 13	±5,2 1,8	8
Подвижный столик. Одна направляющая качения. Рис. 2.9в у = 105; L = 38	±720 290	±6000 1050	±500 200	±2 1,1	±0,4 0,3	±3 1,1
Роликовые направляющие. Рис. 4.8 у = 0; L = 60	4500	11000	2300	0,2	0,2	
Примечания: L – база направляющих (ширина или высота), мм; у – вылет (смещение) точки приложения усилия, мм.						

Детали ФМ могут образовывать последовательное, параллельное и смешанное соединение упругих элементов (см. гл. 2.6). Основное влияние на общую жесткость ФМ оказывает жесткость подвижных соединений, смещенных относительно оптической оси.

В обобщённом виде жесткость направляющих качения можно характеризовать формулой

$$C = AL^2 / Y^2, \quad (5.33)$$

Где С – жёсткость по осям Х и У,

А – постоянная, зависящая от числа тел качения, площади контакта и коэффициентов податливости направляющих.

В предельном случае, с целью создания направляющей, имеющей максимальную жесткость, следует стремиться уменьшить вылет У до 0, а размер базовой поверхности L увеличить до бесконечности. Этому случаю соответствуют цилиндрические направляющие, в случае, когда оптическая ось совмещена с осью цилиндра направляющих.

Если выходные параметры ОП связаны с координатами Х, У и Z

объекта функциональной зависимостью $F = f(X, Y, Z)$, то изменения координат X, Y и Z вызывают отклонения F . Тогда отклонения ΔF

$$\Delta F = F_x' \frac{P_x}{C_x} + F_y' \frac{P_y}{C_y} + F_z' \frac{P_z}{C_z}.$$

Жесткость ФМ оказывает большое влияние на динамические свойства, виброустойчивость, точность и чувствительность перемещений. Источниками колебаний служат и внешние причины, например, работа близко расположенного оборудования, проходящий транспорт, резонансные колебания зданий и т.д. Наличие колебаний приводит к появлению чередующихся по знаку деформаций, т.е. к нарушению стабильности ОП. Поэтому обеспечение необходимой виброустойчивости ОП – одна из основных задач конструктора.

Круговая частота собственных колебаний ω_0 равна

$$\omega_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{m}} \quad (1/\text{сек}) \quad \text{или} \quad \omega_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta_{\text{ст}}}}, \quad (5.34)$$

где m – масса, кг,
 C – жесткость, Н/см,
 g – ускорение свободного падения,
 $\delta_{\text{ст}}$ – деформация под действием массы m .

Конструктору оптических приборов приходится учитывать колебания систем с вращательным движением (крутильные колебания) и систем с поступательным движением. Расчетные формулы для определения виброустойчивости в обоих случаях имеют сходный характер. Для многих лабораторных ОП, не имеющих электромеханических приводов, источником колебаний ФМ являются колебания оснований или других опорных частей приборов. Частота таких колебаний определяется как конструкцией ФМ и ОП, так и способом установки ОП, жесткостью и демпфированием опорных элементов. Колебания помещений, в которых располагаются ОП, обычно имеют полигармонический состав и содержат частоты от несколько герц до 400 – 500 Гц с амплитудами от 0,4 до 15 мкм. Колебания имеют вертикальную и горизонтальную составляющие.

При жесткой установке ОП колебания примерно повторяют колебания пола.

При других видах установки колебания отличаются в той или иной степени от колебаний основания.

Технический расчет колебаний представляет обычно определение частоты собственных колебаний ω_0 и сравнение ее с частотой возмущающей силы ω . Явление резонанса не наблюдается, если $\omega_0 \neq \omega$ и

они отличаются одна от другой не менее чем на 20 – 30%.

При выполнении расчётов выделяют наиболее неблагоприятные узлы в смысле виброустойчивости. Например, для микроскопа наиболее важны смещения системы “объект – объектив”. Наименьшую жесткость имеет колебательная система, образованная массами фокусировочного механизма – кронштейна и предметного столика. На рис. 2.9 были приведены экспериментальные результаты измерения деформаций в зависимости от нагрузки. Поэтому, зная общую массу столика и кронштейна, равную 2 кг, и определив из графика (см. рис. 2.9в), что нагрузке $P_{x1} = 20\text{Н}$ соответствует смещение по оси X, равное 24 мкм, по формуле (5.34) найдем, что частота собственных колебаний по оси X равна

$$\omega_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{9810}{0,024}} = 98 \text{ Гц.} \quad (5.34)$$

Для значений жесткости ФМ (см. табл. 5.1) при массе узлов от 0,5 до 4кг, характерных для ФМ микроскопов, частота собственных колебаний составляет 30 – 500 Гц. Полученные результаты необходимо учитывать при разработке новых приборов с механическими приводами, особенно если учесть, что используемые моторы имеют число оборотов в пределах от 750 до 5000 об/мин, т.е. являются источниками колебаний с частотой от 12 до 83 Гц.

Для повышения жесткости ФМ следует использовать рекомендации, изложенные в разделе 2.8. В качестве рациональных конструкций с точки зрения жесткости следует еще раз отметить ФМ симметричной формы у которых оптическая и механическая оси совмещены.

Упражнения: определите частоту колебаний по осям X, Y, Z, используя результаты измерений ФМ, приведенные на рис. 2.9.

5.7. Влияние системы "человек – оптический прибор" на конструкцию фокусировочного механизма

Большинство ФМ эксплуатируют с участием человека, который производит управление прибором и, часто, первоначальную обработку поступившей зрительной информации. Поэтому человек и ОП образуют целостную систему "человек – ОП" (см. рис. 5.1), которая характеризуется присущими ей отношениями между оператором и ОП, в которой предпочтение должен иметь человек. Рационализация ФМ в отношении эргономики повышает удобство и эффективность труда, потребительские свойства ОП и включает:

– обеспечение наилучшего проявления используемой функции человека (например, максимальной точности наводки, скорости

фокусирования и т.д.);

- сохранение длительной работоспособности на высоком уровне;
- наиболее короткий период адаптации;
- наименьшие изменения результатов работы (уменьшение ошибки оператора);
- синхронность компонентов системы "человек – ОП" (например, соответствие восприятия зрительного канала, действий рук оператора и органов управления ФМ).

У отдельных ОП, например, микроскопов при фокусировании оператор производит руками тонкие и длительные манипуляции. В таких случаях необходимо, чтобы конструкция прибора обеспечивала оператору удобство положения рук при работе, что связано с максимальной площадью прилегания рук к поверхности стола или с наличием специальных подлокотников.

У некоторых приборов возможности ручного управления достигли предела. Например, в стереомикроскопах, используемых при микрохирургии, в связи с тем, что руки хирурга заняты выполнением операции, многие функции управления переданы ногам – фокусирование микроскопа, переключение увеличений и т.д. Поэтому актуальной становится разработка систем управления ФМ с помощью использования голоса, зрительного канала и осязания.

Сравнение наиболее распространенных органов управления ФМ приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Характеристика	Нажимная ручная кнопка	Поворотная рукоятка	Поворотная ручка
Точное регулирование	–	–	+++
Грубое регулирование	–	++	++
Время регулирования	+++	++	–
Занимаемое пространство	+++	+	+
Визуальное опознавание положения	–	++	* ++
Тактильное опознавание положения	–	++	+
Эффективность комбинированного органа управления			** +++
Примечание: “+++” – хорошо, “++” – удовлетворительно, “+” – приемлемо, “–” – лучше не применять, “*” – при повороте ручки с указателем менее чем на 360°, “**” – ручки смонтированы концентрично на одной оси.			

При разработке органов управления ФМ учитывается мнемоничность управления, т.е. соответствие движения органов управления, СЧ прибора и стрелок индикаторов (табл.5.3).

Мнемоничность управления позволяет уменьшить ошибки оператора, повысить скорость его работы и освобождает память от излишнего запоминания. Направление вращения органов управления должно определяться с лицевой или правой стороны.

Таблица 5.3

Направление перемещения органов управления	Состояние или направление движения узла или указателя
Кнопки: нажатие верхних, передних или правых. Ручек или маховичков: поворот по часовой стрелке, вправо.	"Включено", "Пуск", "Подъем", "Вправо", "Вверх", "Сближение", "Вперед".
Рычагов или рукояток: поворот вниз, на себя, влево.	"Выключено", "Стоп", "Назад", "Влево", "Вниз", "Расхождение"

Следует подчеркнуть необходимость соблюдения мнемоничности управления в оптических визуальных приборах. При работе на таких приборах иногда невозможно наблюдать за направлением движения СЧ прибора вследствие недоступности наблюдения за ними (например, оптические системы перемещаются внутри прибора) или вследствие очень медленного их перемещения вдоль оптической оси, когда невозможно определить направление перемещения изображения. Поэтому в ОП часто используют различные способы оборачивания изображения в оптических системах или изменение направления движения ФМ с тем, чтобы обеспечить соответствие направления перемещения предмета, изображения, органов управления ФМ и индикаторов.

5.8. Испытания и аттестация фокусирующих механизмов

Из всего вышеизложенного следует, что ФМ в зависимости от назначения ОП, выполняемой в нем функции и других факторов отличаются большим многообразием в отношении принципов действия, схем, конструкции и т.д.

Необходимо учитывать и тот факт, что испытания опытных образцов ФМ и их приемка при серийном изготовлении обычно существенно отличаются по содержанию и количеству проверяемых параметров. Поэтому технические требования, условия и другая документация, а также стенды, контрольно-измерительная аппаратура и т.п., используемые при исследовании опытных образцов и при приемке серийных ФМ, могут быть

разными. Техническая документация должна содержать общие технические требования, которые широко освещены в литературе (см. например, "Справочник конструктора опико-механических приборов", под редакцией В. А. Панова, 1980г., глава 20), а также специальные требования, вытекающие из особенностей назначения и функционирования ФМ.

Например, у опытных образцов следует проверять передаточные отношения, цену деления, диапазон перемещения, мнемоничность управления и т.д. Часть из проверок детерминированных параметров с целью сокращения затрат при приемке серийных образцов не используется, поскольку они не зависят от качества изготовления, а определяются конструкцией ФМ.

Для каждого типа ФМ следует составлять свою программу исследования опытного образца и свои технические требования для серийного изготовления.

Рассмотрим в качестве примера программу исследования опытного образца и технические требования к серийным ФМ микроскопа. Программа исследования опытных образцов ФМ микроскопов включает следующие пункты:

1) измерение и проверка основных конструктивных параметров – величины перемещения тонкой и грубой подач, определение перемещения на один оборот рукояток тонкой и грубой подач, диапазона перемещения грубой подачи от сфокусированного положения микроскопа вверх и вниз, проверку работы конечных фиксаторов или иных ограничителей диапазонов тонкой и грубой подач, величины моментов трогания на рукоятках, проверку работы устройств для регулирования моментов на рукоятках (если они предусмотрены в конструкции);

2) измерение точности перемещения вверх и вниз тонкой подачи на интервалах 20, 100, 250, 500 и 1000 мкм;

3) измерение мертвого хода в сфокусированном и в смещенном на 10 мм. вниз положениях грубой подачи, в трех точках тонкой подачи через 0,5 мм, при разных начальных направлениях вращении рукоятки тонкой подачи;

4) исследование неравномерности движения механизмов тонкого и грубого движения с помощью записи кинематограммы;

5) измерение жесткости и остаточных деформаций ФМ по осям X, Y, Z и построение гистограмм;

6) исследование наводочных свойств механизмов тонкой и грубой подач по количеству наводок и субъективной оценке наблюдателей (не менее пяти человек) по трехбалльной шкале (хорошо, удовлетворительно, плохо) со всем комплектом объективов, входящих в микроскоп;

7) исследование стабильности положения сфокусированного микроскопа через интервалы 10, 20, 40, 60 и 120 мин.;

8) исследование износоустойчивости ФМ. После 300 – 500 тысяч перефокусировок проверить ФМ по пп. 2 – 7 программы;

9) повторная проверка свойств ФМ после испытаний на тряску и температурных испытаний.

При проведении исследований используют стандартное и специальное оборудование. Обработку результатов измерений следует производить на основе математической статистики. При приемке серийных ФМ обычно проверку ведут только по пп. 3 и 4, на основе субъективной оценки плавности движения.

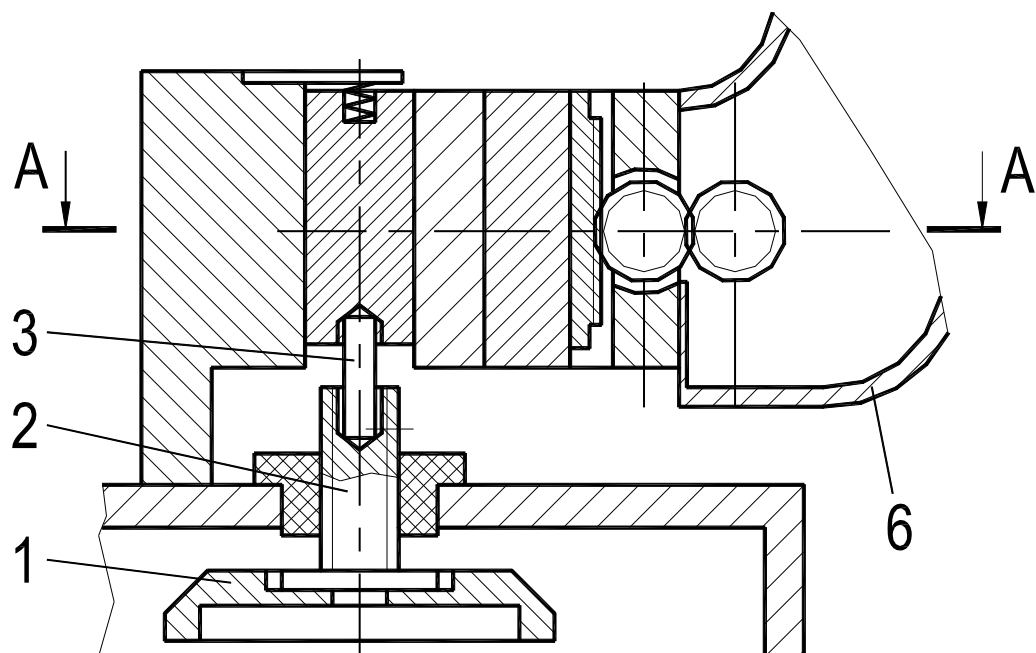
5.9. Пример расчёта схем фокусировочных механизмов микроскопов

Рассмотрим разработку схем ФМ для биологических микроскопов, используемых в здравоохранении, ветеринарии, народном образовании и других областях. Микроскопы служат для визуального наблюдения объектов в проходящем свете с объективами от 4х0,05 до 100х1,25. Поскольку микроскопы применяются, главным образом, при лабораторной диагностике (более 60 % всех приборов), то оптическая схема прибора и конструкция ФМ должны обеспечивать максимальный комфорт для зрительного канала и рук оператора. В то же время ФМ должны быть максимально простыми, технологичными и дешевыми в изготовлении, так как годовой выпуск таких микроскопов составляет 5 – 10 тысяч штук и ФМ определяет 10 – 15 % затрат на изготовление микроскопа.

Конструкция ФМ микроскопа МИКМЕД – 1 показана на рис. 5.37. Для реализации тонкого движения в ФМ применяется винтовой механизм, содержащий рукоятку 1 и винт 2. Штифт 3 перемещает направляющую 4, вместе с ней направляющую грубого движения 5 и тубусодержатель 6. Грубые перемещения тубусодержателя по направляющей 5 выполняются при вращении рукоятки 7 через паразитную шестерню 8 и рейку 9. Рукоятка 7 снабжена конусным тормозом, который предохраняет тубусодержатель от скольжения вниз.

Кинематическая схема для тонкого движения ФМ, приведённая на рис. 5.6в, отличается большой простотой. Такие схемы использовались в микроскопах еще в XVII веке. В схеме грубой подачи паразитная шестерня 8 (см. рис. 5.37) введена для обеспечения мнемонического требования в отношении сближении объектива и препарата при вращении рукояток 7 правой рукой по часовой стрелке. В схеме (рис. 5.37) используются две направляющих, все детали которых для уменьшения трения изготовлены из латуни. Фокусирование микроскопа производится перемещением тубусодержателя, на котором установлены объективы. Наличие двух направляющих скольжения и большая консоль L (расстояние от оптической оси до опорной плоскости направляющих) снижают жесткость конструкции и увеличивают остаточные смещения вследствие наличия зазоров в направляющих (см. табл. 5.1).

В разделе 5.4.2.3 было выполнено информационное моделирование



A-A

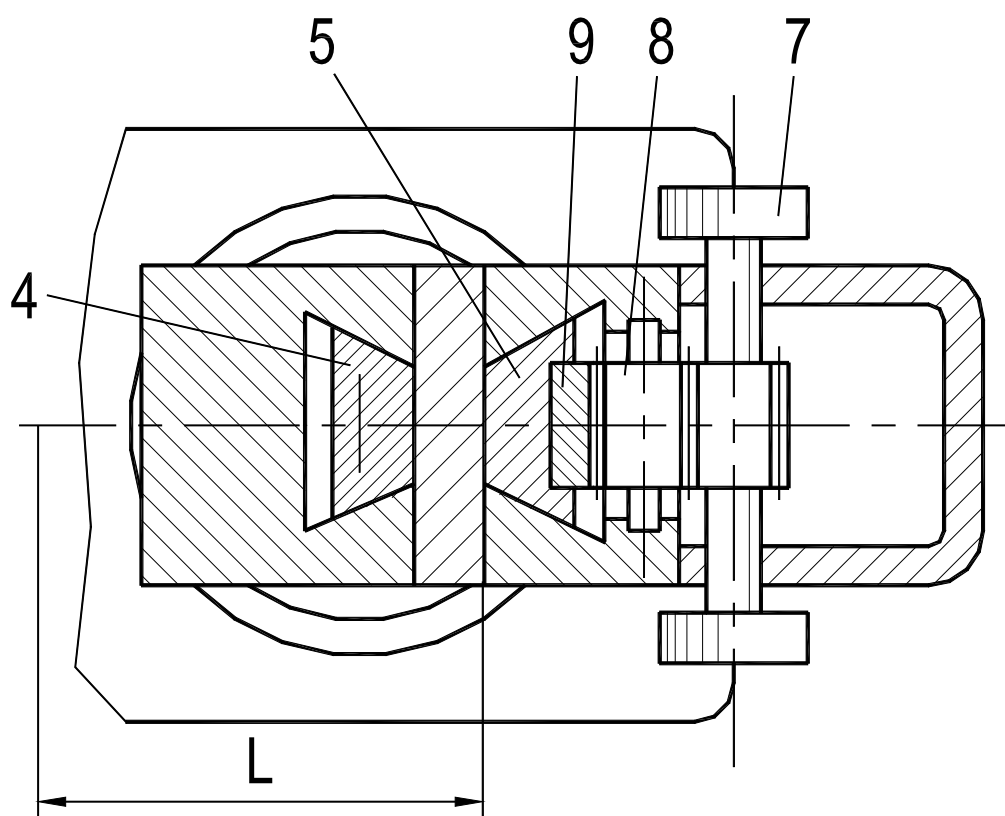


Рис. 5.37. Схема фокусирующего механизма микроскопа

микроскопов. Из проделанного анализа следует, что в современном ФМ для повышения жёсткости и уменьшения остаточных деформаций

конструкции фокусировочные перемещения целесообразно выполнять за счёт перемещения столика микроскопа. ФМ должен иметь одну направляющую, приводимую в движение с помощью зубчато-реечного механизма, и две соосных, горизонтально расположенных рукоятки. Кинематическая схема должна быть максимально простой и обеспечивать разработку технологичной конструкции.

Сравнение конструкции ФМ микроскопа МИКМЕД– 1 и информационной модели по общим оценкам показало, что по способу фокусирования, жесткости конструкции, величине остаточных деформаций, количеству направляющих и используемому в них виду трения (скольжения) серийный ФМ уступает информационной модели. Поэтому на основе информационной модели был разработан ФМ для более сложного микроскопа – МИКМЕД – 2.

В таблице 5.4 приведены кинематические схемы этих ФМ.

Схема ФМ №1 соответствует серийной модели микроскопа МИКМЕД – 1, конструкция которого приведена на рис. 5.37. Схема №2 используется в более дорогих и сложных моделях микроскопов МИКМЕД – 2 и в значительной степени соответствует информационной модели. Ее описание было выполнено при рассмотрении рис. 5.7а и 5.14. ФМ имеет одну направляющую и две горизонтальных соосных рукоятки для тонкого и грубого движений. Но конструкция такого ФМ сложнее.

Для аддитивной оценки сложности кинематических схем ФМ используются суммы числа звеньев и пар, или суммы произведений кинематических пар на класс пары соответствующих схем. Это сделано на основании предположения, что в большинстве случаев каждое дополнительное звено и произведение числа пар на класс пары приводят к дополнительным затратам на их осуществление (см. гл.3).

Так как схемы обоих механизмов нами выбраны, то выполним расчёт кинематики.

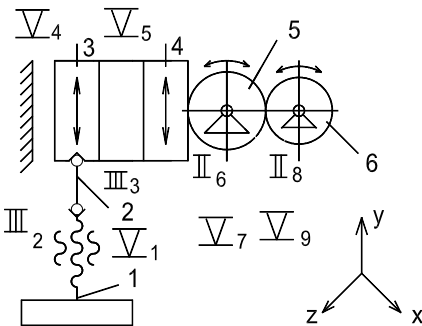
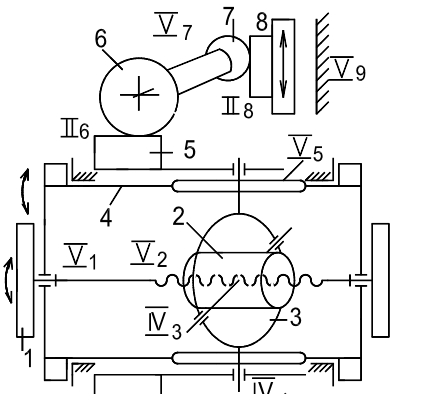
Вначале определим основные параметры, определяющие схемы механизмов. Глубина резкого изображения T' объектива с наибольшим увеличением и апертурой $100\times 1,3$ равна

$$T' = n\lambda/2A^2 = (1,5\times 0,55)/2\times 1,3^2 = 0,24.$$

Минимальная скорость фокусирования V_z (см. раздел 5.3) при $C = 30$ бит/с, $K = 7$, $N = 100$

$$V_{z \min} = \frac{TC}{K \log 2N} = \frac{0,24 \times 30}{7 \times 7} = 0,15 \text{ мкм/сек.}$$

Таблица 5.4

N ^o	СХЕМА И СТРУКТУРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ	Число p пар по классам					Число пар $\sum p$	Число звеньев $\sum n$	Оценка сложности $\sum p + \sum n$
		I	II	III	IV	V			
1		0	2	2	0	5	9	6	15
2		0	2	0	2	5	9	8	17

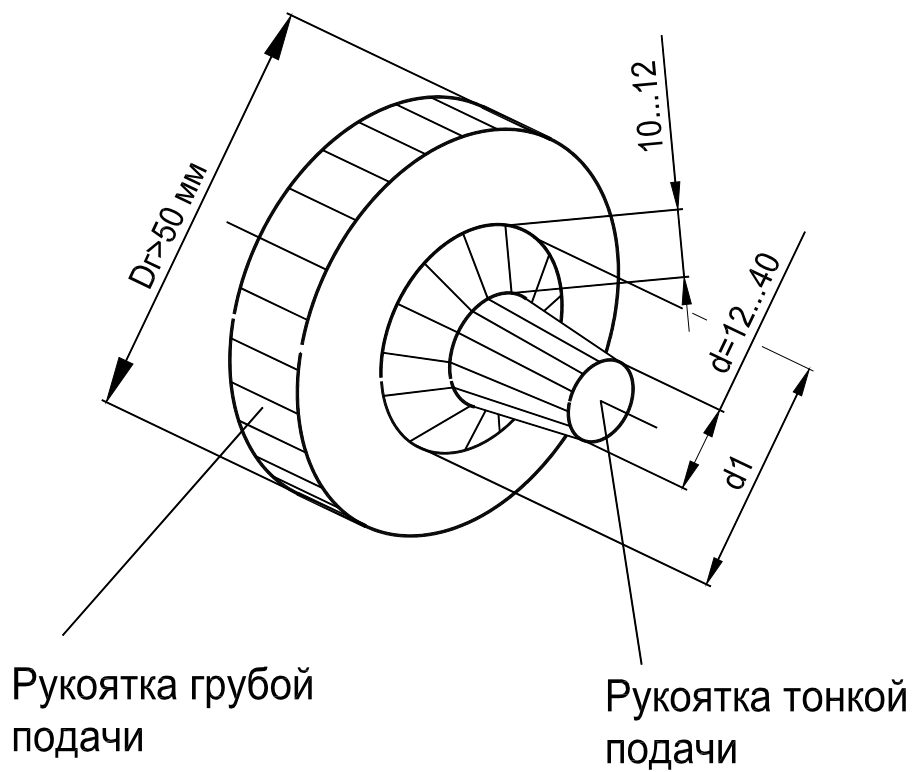


Рис. 5.38. Рукоятки фокусировочного механизма

Рассмотрим кинематику механизма №1 (рис. 5.37), в которой для тонкой подачи рукоятка управления установлена на винте, имеющем шаг $t = 0,5$ мм, т.е. при одном обороте винта фокусируемый объект перемещается на величину $\Delta l_{тп} = 0,5$ мм. Поэтому из формулы (5.10) можно найти диаметр рукоятки

$$d_{тп} = \frac{\Delta l_{тп}}{10\pi V_z} = \frac{0,5}{10\pi \times 0,00015} = 106 \text{ мм.}$$

Перемещение грубой подачи $\Delta l_{гп}$ на один оборот равно

$$\Delta l_{гп} = \Delta l_{тп} \frac{A^2_{\max}}{A^2_{\min}} = 0,5 \frac{1,25^2}{0,2^2} = 19,5 \text{ мм/об,}$$

где $A_{\max}$, $A_{\min}$ – максимальная и минимальная апертуры объективов из комплекта микроскопа.

При определении перемещения на один оборот грубой подачи целесообразно принять минимальную апертуру $A_{\min} = 0,2$. Приблизительно такую апертуру имеют объективы $5 - 10^x$, у которых значение апертуры находится в пределах от 0,1 до 0,3. Обычно на микроскопах исследования объекта и начинают с таких увеличений.

Поскольку грубая подача осуществляется с помощью шестерни 6 (см. схему 1), то её диаметр $d = 19,5/\pi = 6,2$ мм. Далее следует выполнить прочностной и геометрический расчёты ФМ.

Выполним расчёт кинематики механизма №2.

Предварительно определим минимальный конструктивный диаметр рукоятки тонкой подачи. По данным инженерной психологии диаметр рукоятки для точных наводок должен находиться в пределах от 12 до 50 мм. Так как на рукоятке располагается шкала с делениями, занимающая около 10 – 12 мм (см. рис. 5.38), то диаметр d_1 составит не менее 35 – 40 мм, а рукоятка грубой подачи будет более 45 мм. Винт 1 (см. табл. 5.4) имеет шаг 0,5 мм. Для диаметра $d_1 = 35 - 40$ мм длина окружности составит 110 – 126 мм. Для тонкой подачи цена деления шкалы обычно равна 0,002 мм при расстоянии между штрихами не менее 1 мм, поэтому для 100 – 125 делений шкалы один оборот будет соответствовать перемещению в 0,2 – 0,25 мм. Поскольку в схеме червяк 5 (см. рис. 5.38) выполняет роль рейки для шестерни 6, то передаточное отношение шестерен 7 и 6 должно быть равно 2:1. Принимая для шестерни 7 минимальное число зубцов 20, получим, что шестерня 6 должна иметь 40 зубцов. Тем самым, мы закончили кинематический расчёт тонкой подачи.

Определим диаметр рукоятки тонкой подачи из формулы (5.19)

$$d = \frac{\Delta l_{\text{тп}}}{0,01} = \frac{0,25}{0,01} = 25 \text{ мм.}$$

Далее следует выполнить геометрический и прочностной расчёты деталей тонкой подачи.

Определим кинематические параметры грубой подачи. Перемещение грубой подачи на один оборот рукоятки составит

$$\Delta l_{\text{гп}} = \Delta l_{\text{тп}} \frac{A^2_{\text{max}}}{A^2_{\text{min}}} = 0,25 \frac{1,25^2}{0,2^2} = 9,76 \text{ мм/об.}$$

Обеспечить такое перемещение грубой подачи на один оборот затруднительно по следующим причинам:

- в червячной передаче ввиду технических трудностей, связанных с изготовлением червяка, число заходов червяка K не должно превышать 8;
- поскольку в схеме используется червячная передача, желательно обеспечить её самоторможение, что упрощает конструкцию, так как исключаются тормозные устройства.

Поэтому с учётом максимально возможного передаточного отношения червячной передачи 8:40 перемещение на один оборот рукоятки грубой подачи составит

$$\Delta l_{\text{гп}} = \frac{8}{40} 20\pi = 4 \times 0,5\pi = 2\pi = 6,28 \text{ мм/об.}$$

Проверим, какой минимальной апертуре A_{min} объектива соответствует это перемещение

$$A_{\text{min}} = A_{\text{max}} \sqrt{\frac{\Delta l_{\text{тп}}}{\Delta l_{\text{гп}}}} = 1,25 \sqrt{\frac{0,25}{6,28}} = 0,25$$

Такую апертуру имеют объективы с увеличениями до $10\times$. Обычно с таких объективов и начинается работа на микроскопе. Поэтому принятая величина перемещения грубой подачи вполне приемлема.

Диаметр рукоятки грубой подачи, определённый по одной из формул, составляет несколько миллиметров. Поэтому определяем его по конструктивным габаритам (см. рис. 5.38) и принимаем равным 52 мм. Такой диаметр грубой подачи, значительно увеличенный по сравнению с расчётным, позволит фокусировать объекты при апертурах объективов

до 0,4. Таким образом расширяются наводочные свойства механизма.

Проверим червячную пару на самоторможение. В данной конструкции червяк имеет делительный диаметр d_2 , равный 32 мм. Такой относительно большой диаметр вызван введением в механизм тонкого перемещения компенсирующего элемента, состоящего из кольца 3 и осей, который устраняет избыточные связи в механизме и упрощает сборку ФМ. Угол подъема витков ω на делительном диаметре d_2 при осевом модуле $m_s = 0,5$ составит $\operatorname{tg} \omega = K m_s / d_z = 8 \times 0,5 / 32 = 0,125$, что соответствует углу подъема винтовой линии $7^\circ 08'$. Этот угол немного превышает допустимый. Учитывая, что в ФМ существуют и дополнительные причины, вызывающие увеличение сил трения (в частности, силовое замыкание механизма за счёт веса столика и дополнительной пружины) можно угол подъема не уменьшать. Кроме того, для уменьшения угла подъема до $5 - 6^\circ$ необходимо увеличить делительный диаметр червячного колеса до 40 – 50 мм, что в данной конструкции ФМ невозможно. Таким образом, кинематический расчёт ФМ закончен и можно приступить к геометрическому, точностному и прочностному расчётам.

Рассмотрим расчет жесткости ФМ микроскопа, конструкция которого представлена на рис. 5.14. Определим смещение для точки О (рис. 5.39), находящейся на оптической оси прибора, от действия силы Р, приложенной к кронштейну 1 столика, который четырьмя винтами закреплен на направляющей 2, имеющей с каждой стороны по восемь шариков 3. Боковые направляющие 4 установлены на основании 5 с помощью пяти винтов.

Общая деформация δ_0 механизма от нагрузки Р включает следующие основные составные части: деформацию δ_1 в резьбе четырех винтов М4, крепящих кронштейн 1 к направляющей 2, деформацию δ_2 шариковых направляющих 2 и 4, и деформацию δ_3 винтов М4, крепящих направляющие 4 к основанию 5, т.е. $\delta_0 = \delta_1 + \delta_1 + \delta_1$.

Деформация δ_1 определяется как $\delta_1 = \varphi_1 y_1$, где φ_1 – угол поворота кронштейна 1 при деформации крепящих его винтов; y_1 – вылет кронштейна 1, равен $97 - 7 = 90$ мм.

Жесткость винтового соединения C_1 можно определить аналогично методике, изложенной в гл. 2.2.6: $C_1 = L_1^2 n_1 / (4 y_1^2 K_v)$, где n_1 – количество винтов ($n_1 = 4$), K_v – коэффициент податливости резьбы М4 ($K_v \approx 0,00025$ мкм×см/Н).

Жесткость шариковых направляющих $C_2 = L_2^2 \times N / (2 y_2^2 \times K_{ш})$, где L_2 – база между шариками ($L_2 = 32$ мм), N – количество шариков ($N = 8$), y_2 – вылет от шариковой направляющей до оптической оси ($y_2 = 97$ мм).

Деформация δ_3 зависит от податливости винтов и определяется аналогично деформации δ_1 . Жесткость этого соединения

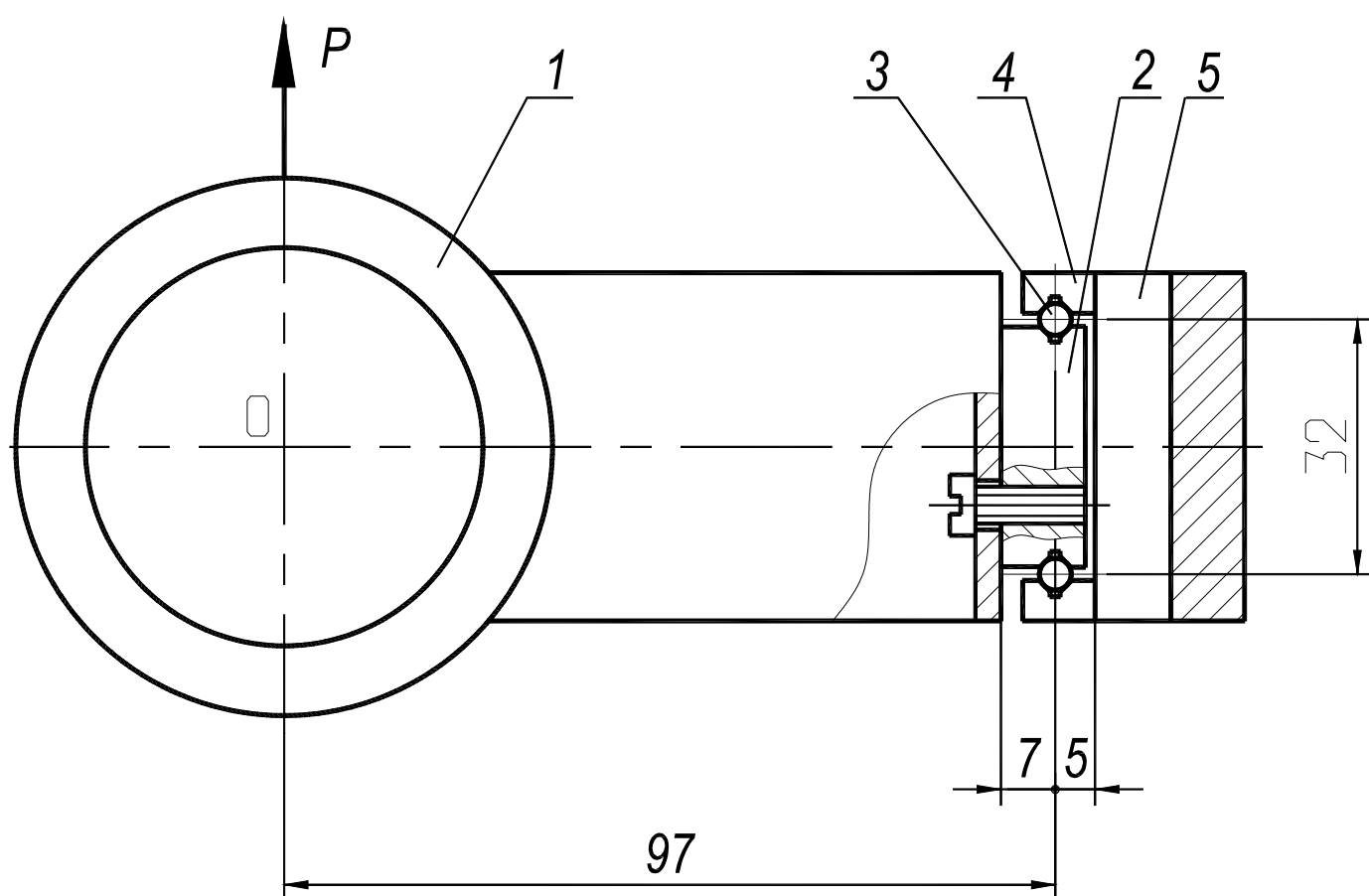


Рис. 5.39. Расчет жесткости ФМ микроскопа

$C_3 = L_3^2 \times n_2 / (4y_3^2 \times K_b)$, где L_3 – база между винтами, n_2 – число крепёжных винтов на одной направляющей ($N_2 = 4$), $y_3 = 97 + 5 = 102$ мм – расстояние от опорной плоскости до оптической оси.

Общая жесткость C_0 механизма, имеющего последовательное соединение элементов,

$$\frac{1}{C_0} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}.$$

Подставляя численные значения, получим

$$C_1 = \frac{20^2 \times 4}{4 \times 90^2 \times 0,00025 \pi \times 0,4^2 / 4} = 1568 \text{ Н/мм},$$

$$C_2 = \frac{32^2 \times 8}{2 \times 97^2 \times 0,0002} = 2177 \text{ Н/мм},$$

$$C_3 = \frac{48^2 \times 5}{4 \times 102^2 \times 0,00025 \pi \times 0,4^2 / 4} = 8811 \text{ Н/мм}.$$

Общая жесткость C_0 механизма

$$\frac{1}{C_0} = \frac{1}{1568} + \frac{1}{2177} + \frac{1}{8811}.$$

Откуда $C_0 \approx 870 \text{ Н/мм}$.

Экспериментальное значение жесткости подобных ФМ находится в пределах 700...1200 Н/мм в зависимости от качества деталей и сборки. Объемные деформации деталей механизмов не превышают 20...30 % общих деформаций.

Глава 6. Крепление оптических деталей

Конструкция узлов для крепления любых оптических деталей должна обеспечивать её стабильное положение в пространстве.

Крепление оптических деталей подробно описано в литературе. Типовые крепления линз и других круглых оптических деталей приведены в табл. 6.1. Дополнительно на рис. 6.1 показана конструкция закрепления светоделительных пластинок (рис. 6.1а) и пластинок с интерференционным покрытием (рис. 6.1б). Для уменьшения их влияния на качество изображения толщина пластинки должна быть минимальной и равна 0,6 мм. у светоделительной и 0,9 мм. у пластинок с интерференционным покрытием. При закреплении в пластинках не должны возникать натяжения. Поэтому светоделительную пластинку (рис. 6.1а) свободно закладывают в оправу с зазором в 0,03...0,05мм. Более толстую пластинку (рис. 6.1б) приклеивают к оправе герметиком.

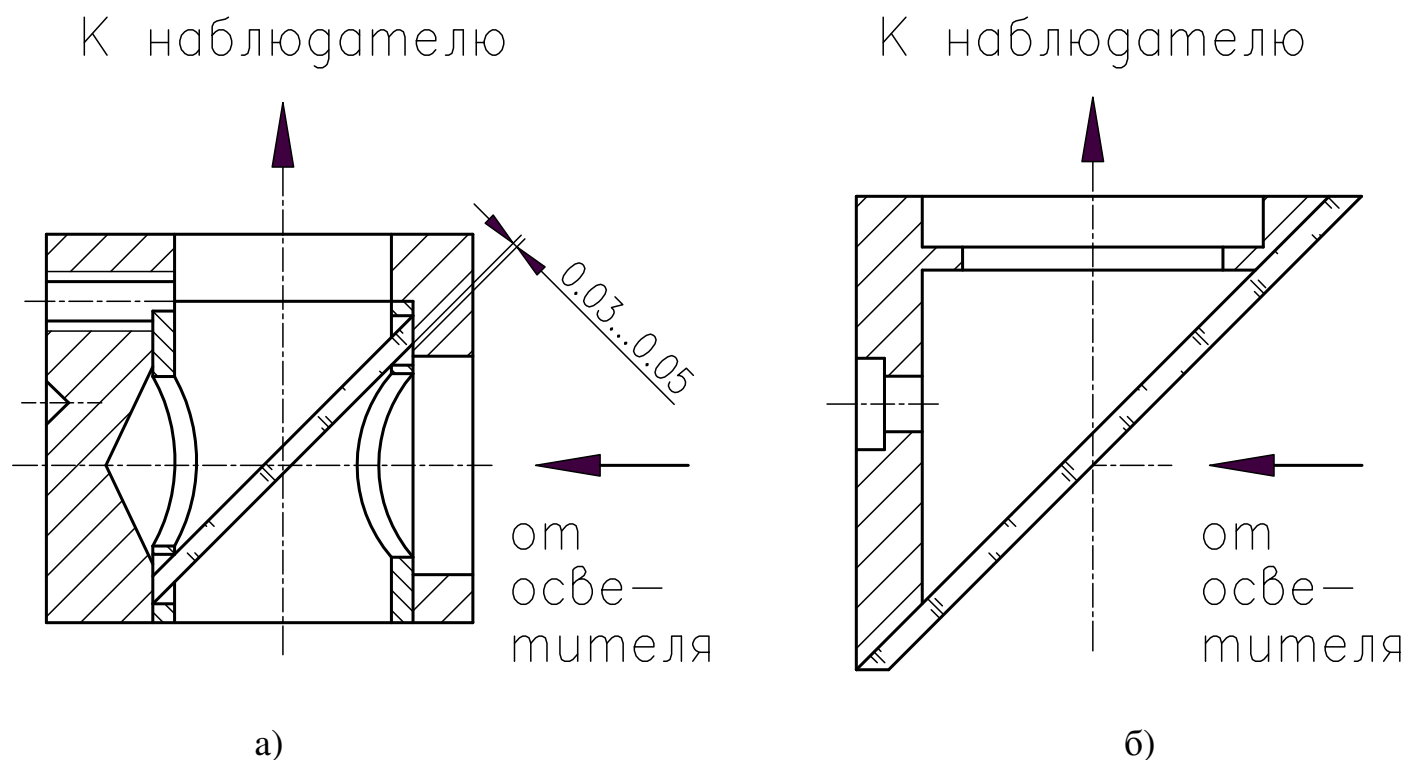
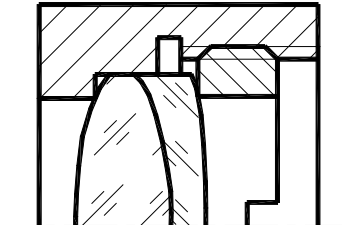
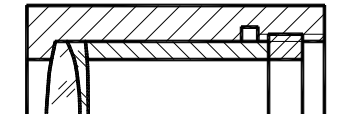
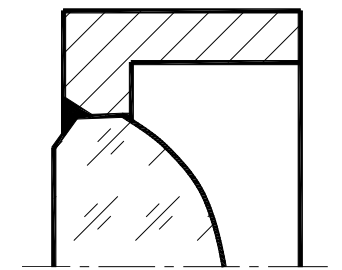


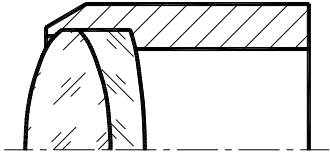
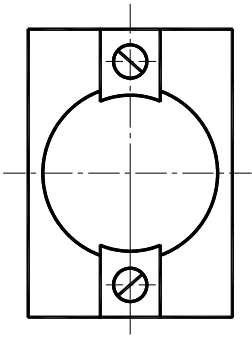
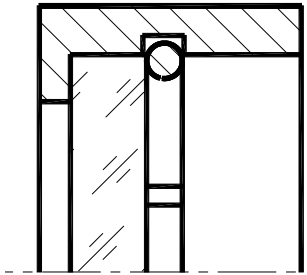
Рис. 6.1. Крепление светоделительных пластинок

Рассмотрим также крепление точных зеркал и дифракционных решёток, конструкции которых мало освещены в справочной литературе.

Таблица 6.1

Тип крепления	Примерная схема конструкции	Особенности крепления	Пример крепления
Резбовым кольцом		Высокая прочность, большие габариты вдоль оси, чувствительность к температуре, возможно пережатие линз, использование любого материала. Разъёмное соединение, лёгкий ремонт, диаметр линз от 10 до 200 мм	Широко распространено крепление одиночной или нескольких линз через промежуточные кольца
Промежуточным или пружинным кольцом		Линзы труднодоступны для закрепления, крепление пружинными кольцами тонких линз или при большом нагреве, достаточная прочность. Разъёмное соединение, лёгкий ремонт, диаметр линз от 10 до 100 мм	Крепление пружинными кольцами для уменьшения влияния воздействий на линзы температуры, вибрации и т.д.
Приклеиванием		Малые габариты, небольшая прочность, использование любого материала. Неразъёмное соединение, ремонт затруднителен, требует сушки от нескольких часов до нескольких суток, диаметр линз до 50 мм.	Сравнительно новый вид крепления, из-за простоты конструкции находит все большее применение

Продолжение табл. 6.1

Тип крепления	Примерная схема конструкции	Особенности крепления	Пример крепления
Завальцовкой		Малые габариты вдоль оси, достаточная прочность, частичная компенсация нагрева, оправа обычно изготавливается из латуни ЛС59–1. Соединение неразъёмное, ремонт затруднителен, диаметр линз не более 50мм, отдельных – до 80 мм.	Широко распространено крепление многолинзовых систем с близко расположенными деталями (объективы, окуляры и т.п.)
Пружинными планками		Высокая прочность, изготавливается из любого материала Разъёмное соединение, лёгкий ремонт, диаметр линз более 20 мм.	Крепление пружинными планками, пружинными кольцами и т.п. обычно применяется для деталей большого диаметра и для уменьшения влияния температуры, вибрации и т.п.
Проволочным кольцом		Малые габариты, невысокая стабильность положения линзы, небольшая прочность Разъёмное соединение, лёгкий ремонт.	Используется для крепления неотвечественных деталей (светофильтров, экранов и т.п.)

Изложим требования к взаимному расположению измерительных дифракционных решёток, устанавливаемых в преобразователи линейных перемещений и способы их закрепления в своих оправах. В любом преобразователе имеются, как правило, две решётки: индикаторная 1 (рис. 6.2) и измерительная 1 (рис. 6.3). Индикаторная решётка часто выполняется прозрачной, а измерительная решётка, устанавливаемая на подвижных каретках – отражательной. Поверхности «Б» (см. рис. 6.2) и «В» (см. рис. 6.3) решёток при установке в преобразователях должны быть параллельны друг другу. Допуск параллельности $1,5 - 2'$. Кроме того, поверхность «В» должна быть параллельна направлению перемещения. Допуск параллельности $10 - 20''$.

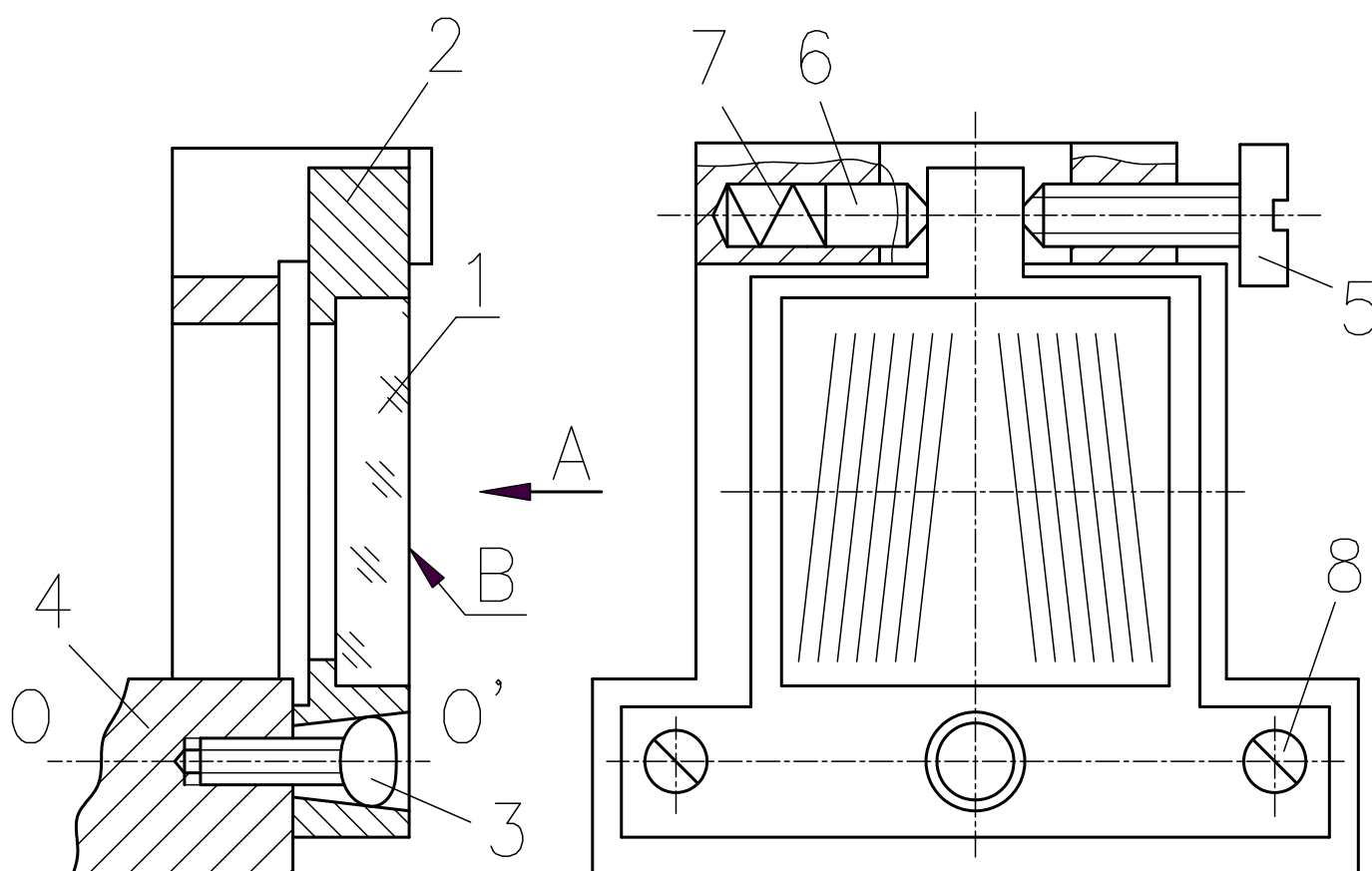


Рис. 6.2. Индикаторная решетка

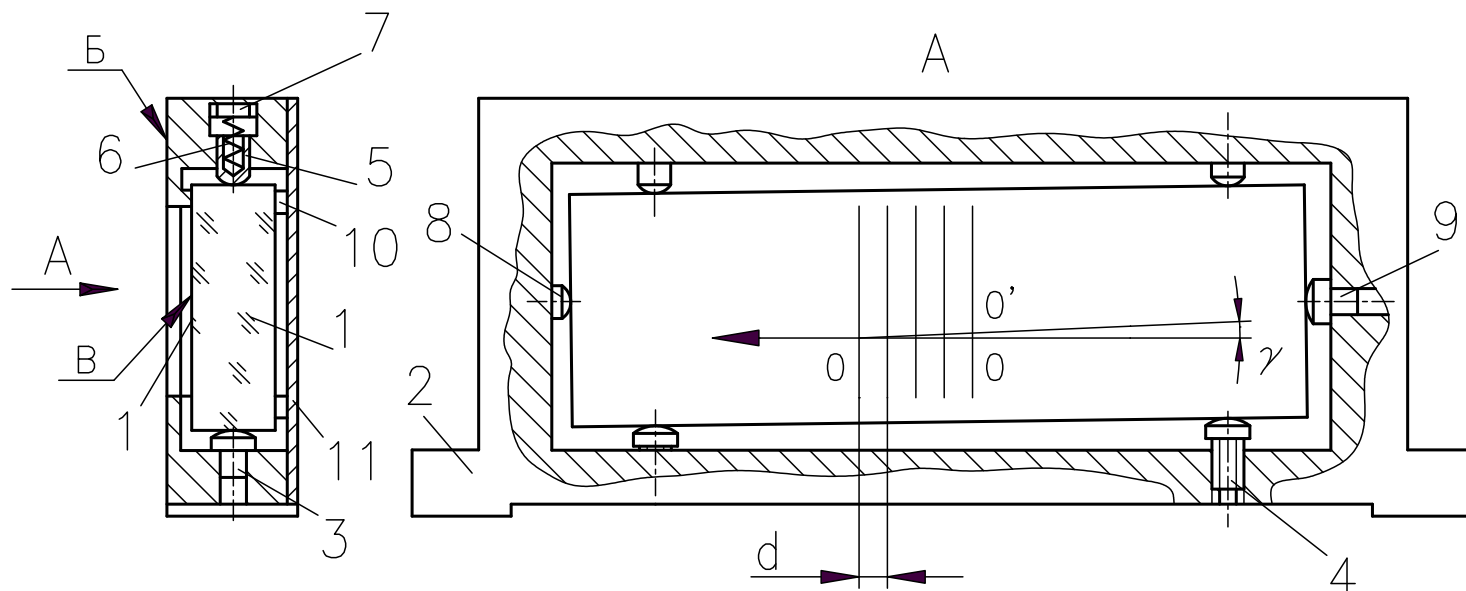


Рис. 6.3. Отражательная решетка

Штрихи решёток должны быть развёрнуты друг относительно друга. Номинальный угол между штрихами должен выдерживаться с точностью $2 - 10''$ в зависимости от типа преобразователя и требований к его точности. Индикаторная решётка 1 (см. рис. 6.2) вклеивается в специальную оправу 2, имеющую внизу конусное отверстие. С помощью винта 3 со сферической головкой оправа с решёткой небольшим усилием поджимается к торцу корпуса 4 и может легко без люфта поворачиваться вокруг оси OO' . Установка необходимого угла осуществляется с помощью винта 5 и пальца 6, поджимаемого пружиной 7. Установка номинального угла с требуемой точностью обеспечивается специальными методами с помощью осциллографа. Фиксирование оправы обеспечивается затяжкой винтов 8. Размеры индикаторных решёток не превышают $32 \times 32 \times 5$ мм.

Отражательные решётки имеют значительно большие размеры, зависящие от пределов измерения. Их длина достигает 700 мм.

Отражательная решётка 1 (см. рис. 6.3) устанавливается в специальную оправу 2. Поверхность «В» решётки опирается в зависимости от размеров на три или четыре выступа в оправе. Поджим к выступам осуществляется плоскими пружинами 10, приклеенными к крышке 11. При этом технологией изготовления оправы обеспечивается параллельность поверхности «В» решётки поверхности «Б» оправы. Допуск непараллельности – $1'$. Это значительно упрощает сборку всего преобразователя непосредственно на приборе.

Нижней поверхностью решётка опирается на два закаленных упора 3 и 4. Упор 4 является регулируемым. Поджим к упорам осуществляется с помощью колпачка 5, пружин 6 и гайки 7. Аналогично с помощью подпружиненного колпачка 8 осуществляется поджим к жёсткому упору 9 сбоку. Упор 4 делается регулируемым с целью юстировки угла между направлением OO' перемещения измерительной решётки, указанного на рис. 6.3 стрелками и линией OO' , перпендикулярной к штрихам решёток,

т.е. направлением, вдоль которого измеряется постоянная решётки (шаг) d .

Необходимость этого определяется тем, что шаг измерительной решётки невозможно сделать абсолютно точным. А это приводит к погрешности при измерении, накопленная величина которой будет пропорциональна ошибке в шаге и длине перемещения. Поэтому шаг d делают при изготовлении решётки всегда меньше номинального значения в пределах $1 \cdot 10^{-4}$ (в относительных единицах), а решётку разворачивают на некоторый угол γ так, чтобы $d/\cos\gamma = d_n$, где d_n – величина, на которую нужно переместить решётку в направлении движения (совпадающем с измерительным) каретки, чтобы решётка в направлении OO' переместилась на один шаг. Например, если шаг решётки равен 9.999 мкм, то разворачивая на угол $\gamma = 48,6'$ получают $d_n = 10$ мкм, что значительно облегчает счёт импульсов. После установки угла упор 4 фиксируют винтом.

Широкое применение точных зеркал и дифракционных решёток в оптико-механических приборах требует систематизации способов их крепления. Рассмотрим рекомендации относительно выбора способа крепления и расчёта требуемых зажимных усилий, поскольку рабочие поверхности зеркал и дифракционных решёток, применяемых в визуальных системах, интерферометрах и спектральных приборах, изготавливают с высокой точностью до 0,1 – 0,5 интерференционной полосы. Деформации при закреплении не должны нарушать точность изготовления деталей, поэтому при выборе способа крепления исходят из точности их рабочих поверхностей и условий работы прибора. Крепления должны быть технологичны, для узла крепления необходимо обеспечить выполнение подвижных разворотов и заклонов с заданной точностью, как и удобство в эксплуатации.

В зависимости от формы зеркал и дифракционных решёток способы их крепления подразделяются на две группы: крепление круглой и некруглой оптики. Каждая из этих групп включает жёсткое и упругое крепления. Упругий вид крепления применяется для зеркал и дифракционных решёток, работающих в условиях вибрации и колебаний температуры, так как исключает возможность возникновения внутренних напряжений в стекле и деформацию рабочих поверхностей оптических деталей.

Для дифракционных решёток стационарных приборов в основном используют крепления, позволяющие ориентировать их определённым образом относительно оправ. Надёжность установки оптической детали обеспечивается креплением её с боков и нерабочей стороны с помощью зажимов, причём с целью уменьшения вероятности деформации рабочей поверхности оптики зажимы располагаются соосно с опорами оправы или таким образом, чтобы зажимное усилие равномерно распределялось на опоры. Количество опор и зажимов зависит от формы и размеров оптической детали (не менее трёх на двух закрепляемых сторонах

прямоугольной оптики). Во избежание деформаций применяют самоустанавливающиеся опоры и зажимы. Зажимы могут быть двух видов: нерегулируемые и регулируемые.

Нерегулируемые зажимы позволяют закреплять оптическую деталь с постоянным, предварительно рассчитанным зажимным усилием, что исключает необходимость дополнительного контроля качества изображения, даваемого оптической деталью после установки её в оправу. Конструктивно зажимы этого вида представляют собой помещённые в оправу 1 (рис. 6.4) – оси 2 с самоустанавливающимися (сферическими) упорами 3 со стороны оптической детали 4.

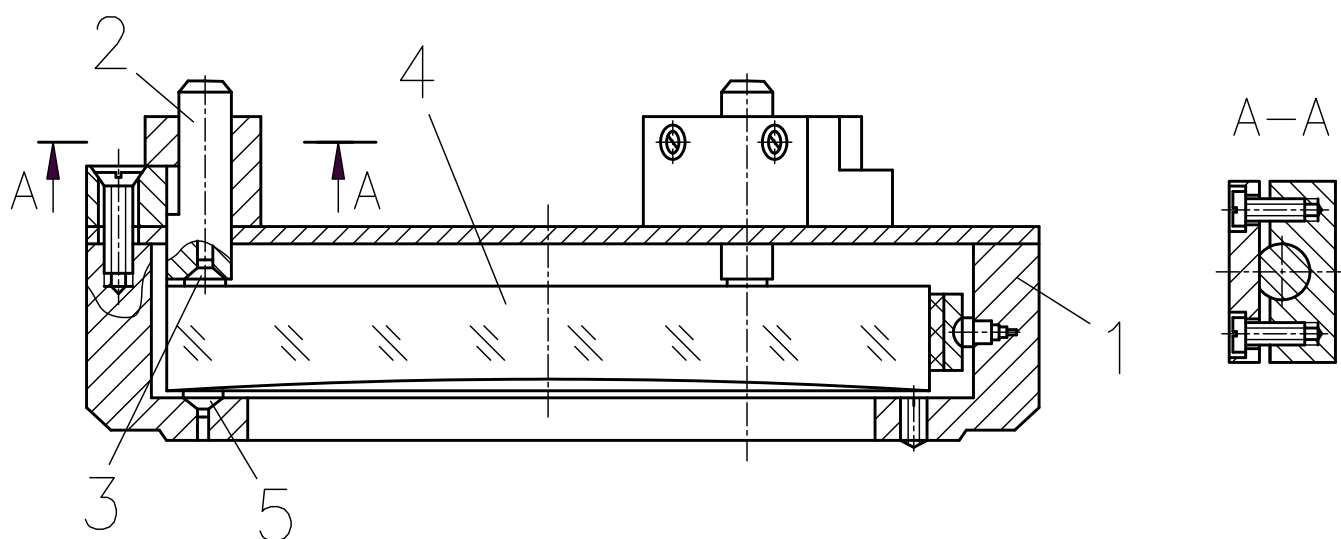


Рис. 6.4. Крепление дифракционной решетки постоянными прижимами

Необходимое зажимное усилие достигается установкой на эти зажимы груза, вес которого равен расчётному, после чего положение зажимов фиксируется (цангами, хомутами, прижимными планками и т.д.). Недостатком этих зажимов является невозможность регулирования зажимного усилия при изменении условий эксплуатации.

Регулируемые зажимы позволяют изменить зажимное усилие как при установке оптической детали в оправу, так и в процессе работы на приборе, в который помещается данный узел, при изменении условий его эксплуатации.

Недостатками этого типа зажимов являются необходимость неоднократного контроля качества изображения, даваемого оптической деталью после установки её в оправу и неравенство зажимных усилий, развиваемых каждым зажимом в отдельности.

Расчёт зажимного усилия Q , развиваемого одним зажимом, производится по формуле

$$Q = \sum F_i , \quad (6.1)$$

где F_i – силы трения в соединениях оптической детали с упором

зажима и опорой зажима с самоустанавливающимся упором на его конце, самоустанавливающейся опоры с оправой.

Допустимый момент M на оси регулируемого зажима легко определить, исходя из конструкции зажима и требуемой величины зажимного усилия Q .

Оптическая деталь прямоугольной формы 1 (рис. 6.5) при креплении в оправе 2 прижимается сверху регулируемым зажимом 3 к двум самоустанавливающимся опорам 4; два зажима 5 и 6, расположенные на боковой стороне оправы и прижимающие оптическую деталь к опоре 7, позволяют осуществить предварительную юстировку зеркала или дифракционной решётки относительно оправы.

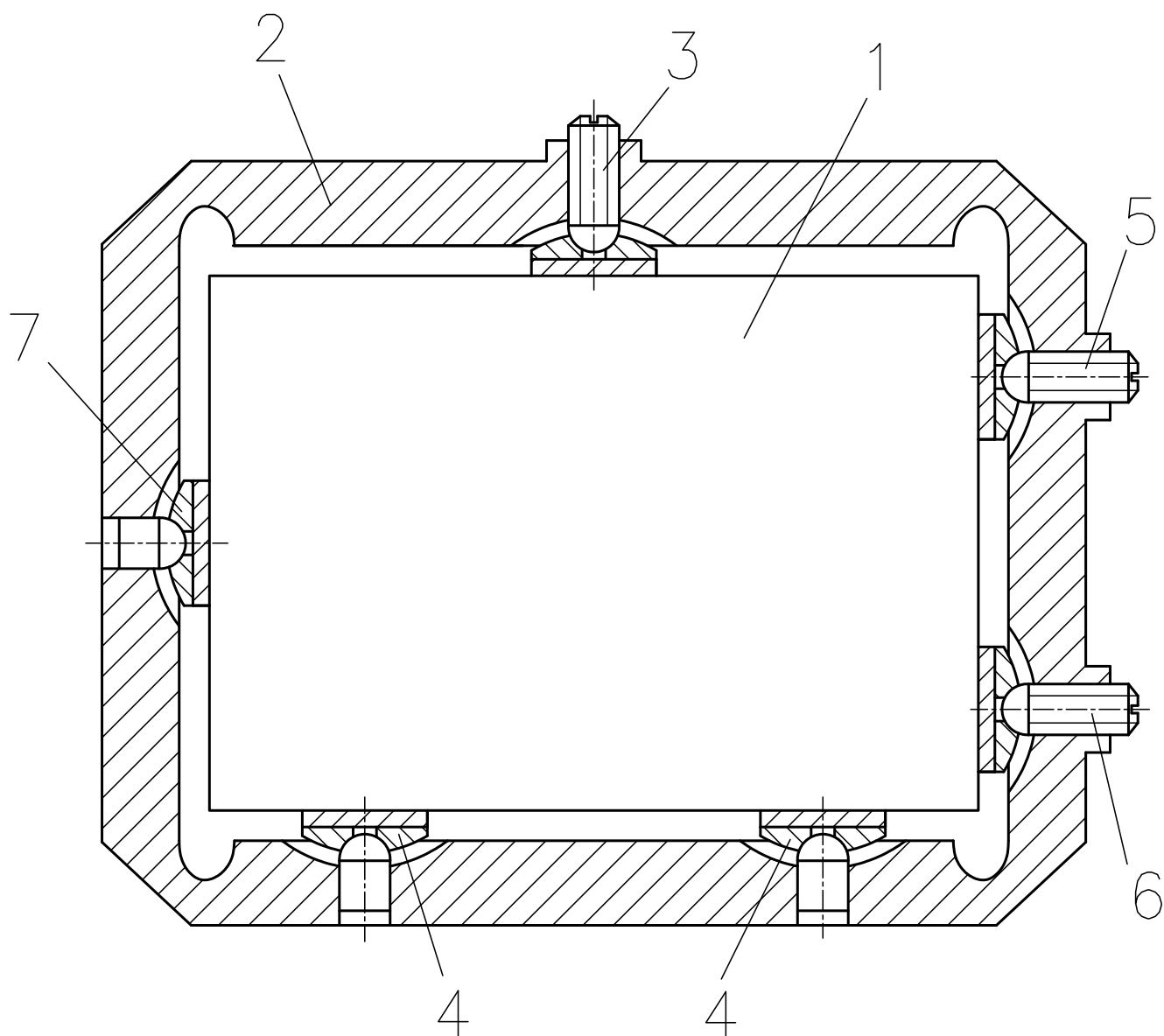


Рис. 6.5. Крепление детали регулируемыми опорами

При работе зеркала в условиях колебаний температуры необходимо применение температурных компенсаторов. В качестве компенсаторов могут служить расположенные соосно опоры и зажимы, показанные на рис. 6.6. Зеркало 1 имеет возможность изменить свои размеры без деформации отражающей поверхности при изменении температуры за счёт скольжения шариков 2 по плоским поверхностям опор 3 и регулируемых зажимов 4, обеспечивающих необходимое контактное усилие для надёжного соединения зеркала с подпятниками 5, лунки которых удерживают шарики от выпадания.

Для крепления оптических деталей, работающих при резких колебаниях температуры, высокой влажности, вибрации, ударах все более широкое применение находят герметики УТ–32 и УТ–34, позволяющие в ряде случаев упростить конструкцию узлов с зеркалами.

Зеркало 1 (см. рис. 6.7) подвешено на трёх планках 2, вклеенных на герметике в пазы зеркала, и крепится регулируемыми самоустанавливающимися зажимами 3 с боков и нерабочей стороны в оправе 4. Упругость герметиков позволяет осуществлять незначительные заклоны зеркала внутри оправы. Узел зеркала, имеющего размеры 200х200х40 мм, выдерживает вибрации с ускорением 3,8g при частоте 140 Гц.

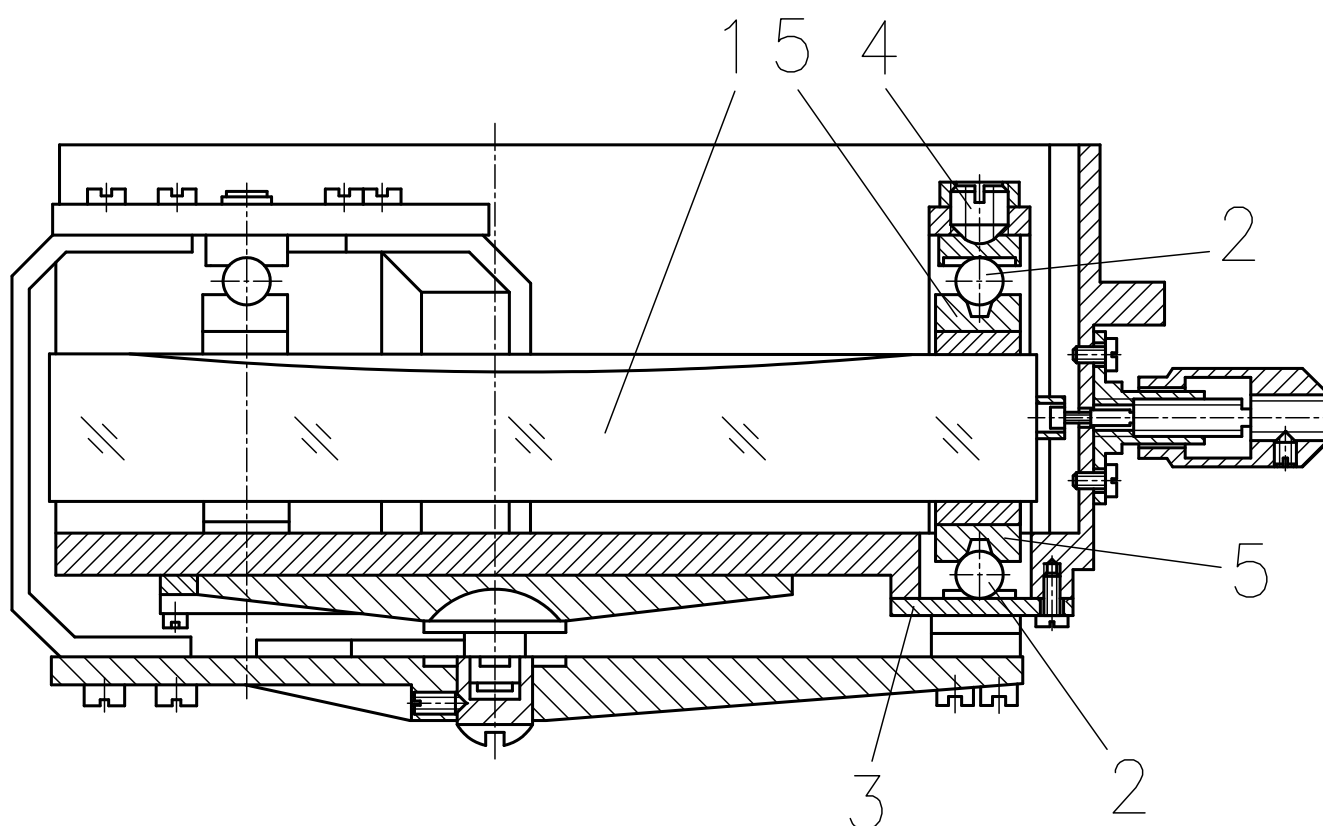


Рис. 6.6. Крепление зеркала температурными компенсаторами

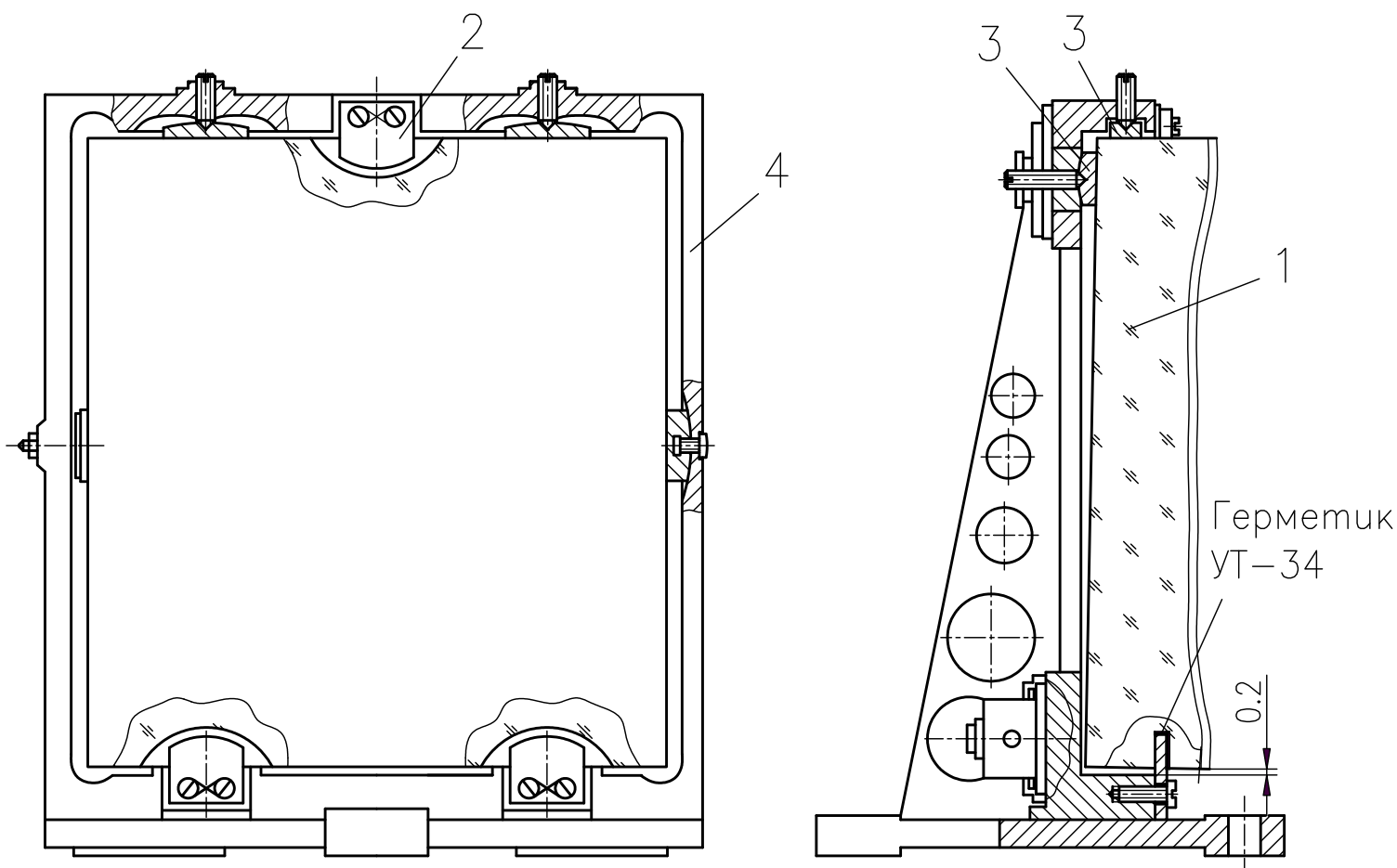


Рис. 6.7. Крепление зеркала на герметике

При сборке и юстировке оптических приборов точность установки зеркал иногда достигает нескольких угловых секунд. Очень важно, чтобы после установки в требуемое положение ориентация узла в пространстве не нарушалась при его закреплении.

На рис. 6.8 изображено зеркало 1, приклеенное к кронштейну 2. После юстировки кронштейна с зеркалом его закрепляют с помощью плоской пружины 3, жёстко скреплённой с основанием 4. При завинчивании винта 5 плоская пружина легко прогибается, практически не передавая никаких дополнительных усилий на кронштейн 2. Момент, возникающий при закреплении винтов 5, также не передаётся на кронштейн 2, т.к. в плоскости, перпендикулярной к чертежу, пружина 3 имеет большую ширину и обладает высокой жёсткостью.

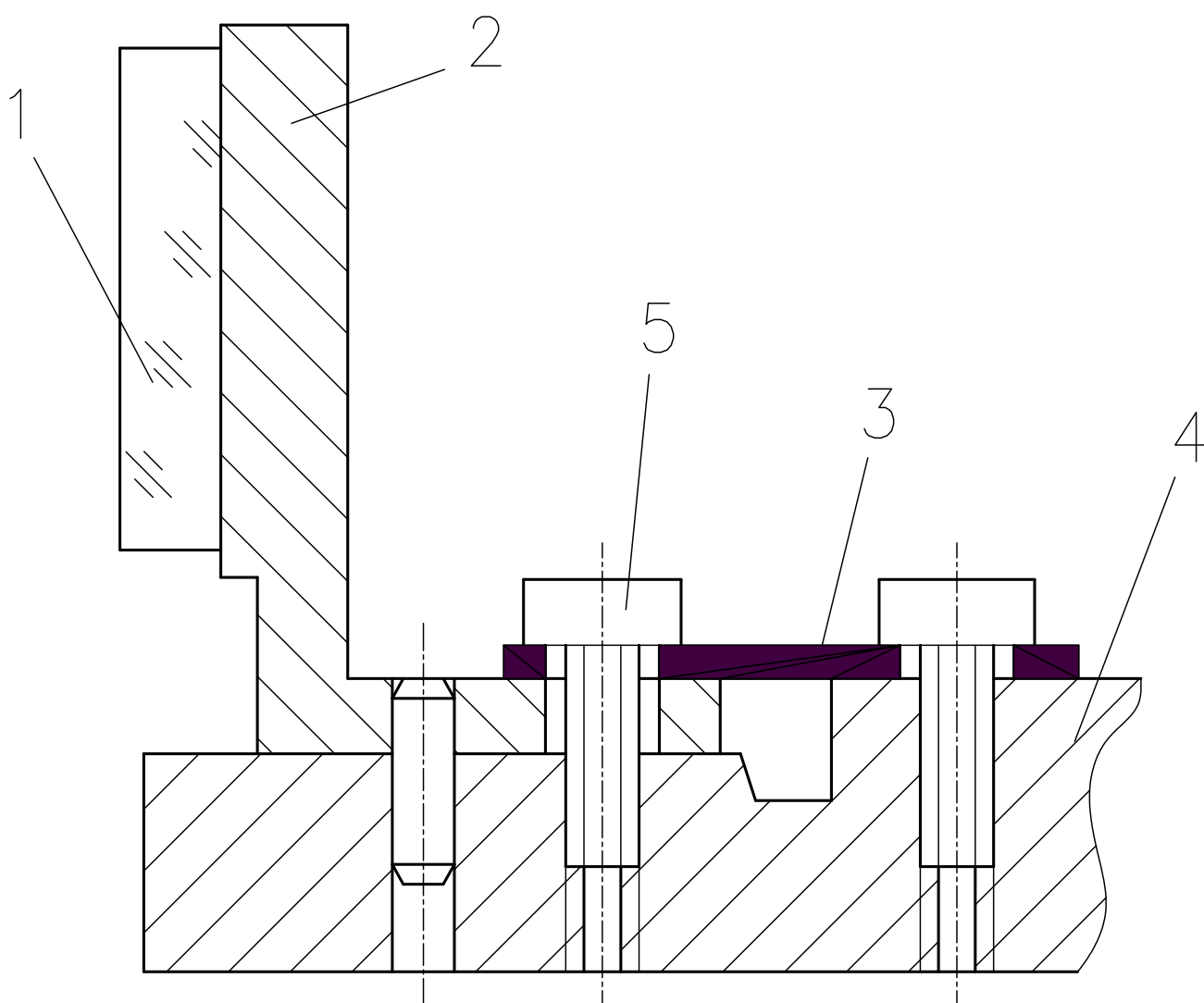


Рис. 6.8. Крепление зеркала, сохраняющее его юстировку

Глава 7. Перемещение оптических деталей

Требования к перемещению оптических деталей и систем (диапазон и траектория перемещения, кинематика движения, точность установки и т.д.) определяются функциональными задачами, выполняемыми оптическими деталями и системами в оптическом приборе при его эксплуатации, и отличаются большим разнообразием. Однако, несмотря на многообразие функциональных задач, механизмы, служащие для перемещения оптических деталей и систем, по своей конструкции, в основном, подразделяются на два типа:

- механизмы, служащие для поступательного перемещения оптических деталей и систем вдоль оптической оси или поворота их в плоскости, перпендикулярной к оптической оси, в прямоугольных или полярных координатах с целью различных видов воздействия на оптический сигнал в процессе эксплуатации прибора;
- транспортировочные механизмы для введения или вывода оптических деталей или систем из хода лучей. Иногда эти функции в механизмах совмещаются.

В этом разделе будут рассмотрены механизмы перемещения общего назначения, не описанные в литературе. Функциональные механизмы целевого назначения, например, фокусирующие, были рассмотрены в главе 5. Механизмы для перемещения снабжаются ручным или автоматизированным приводом. Пока наиболее распространено ручное управление перемещением оптических систем. Часто результаты управления контролируются визуально. При этом возникает обратная связь между зрительным и моторным каналами оператора, благодаря которой значительно повышаются адаптивные свойства системы «человек – оптический прибор», что позволяет существенно упростить механизмы ручного управления при достаточно высокой точности позиционирования оптических систем (до 0,02 мкм в плоскости, перпендикулярной к оптической оси, и до 0,2 мкм вдоль оптической оси). Качество механизма, служащего для перемещения оптических систем или других объектов, можно характеризовать зоной разброса (величиной пространства), в пределах которой находится ошибка наводки (позиционирования).

При ручном управлении процесс установки оптической системы обычно включает два этапа: предварительное перемещение линзовой системы и позиционирование. Рассмотрим процесс совмещения изображения предмета с меткой в плоскости, перпендикулярной к оптической оси. На рис. 7.1а показано совмещение точки предмета А с меткой в поле зрения, расположенной, например, на оптической оси ZZ' . Оператор, стараясь совместить изображение выбранной точки предмета А с меткой в поле зрения, подводит её перемещением линзовой системы 1 или точки А. При этом из-за несовершенства механизма, ограниченных возможностей оператора и в зависимости от увеличения оптической

системы изображение находится в зоне разброса $\Delta X'$. В верхней части рисунка показано, как изменяется скорость перемещения линзы 1 при приближении метки к зоне разброса. У оператора возможны перерывы движения и корректировка положения систем (пунктирные линии на графике).

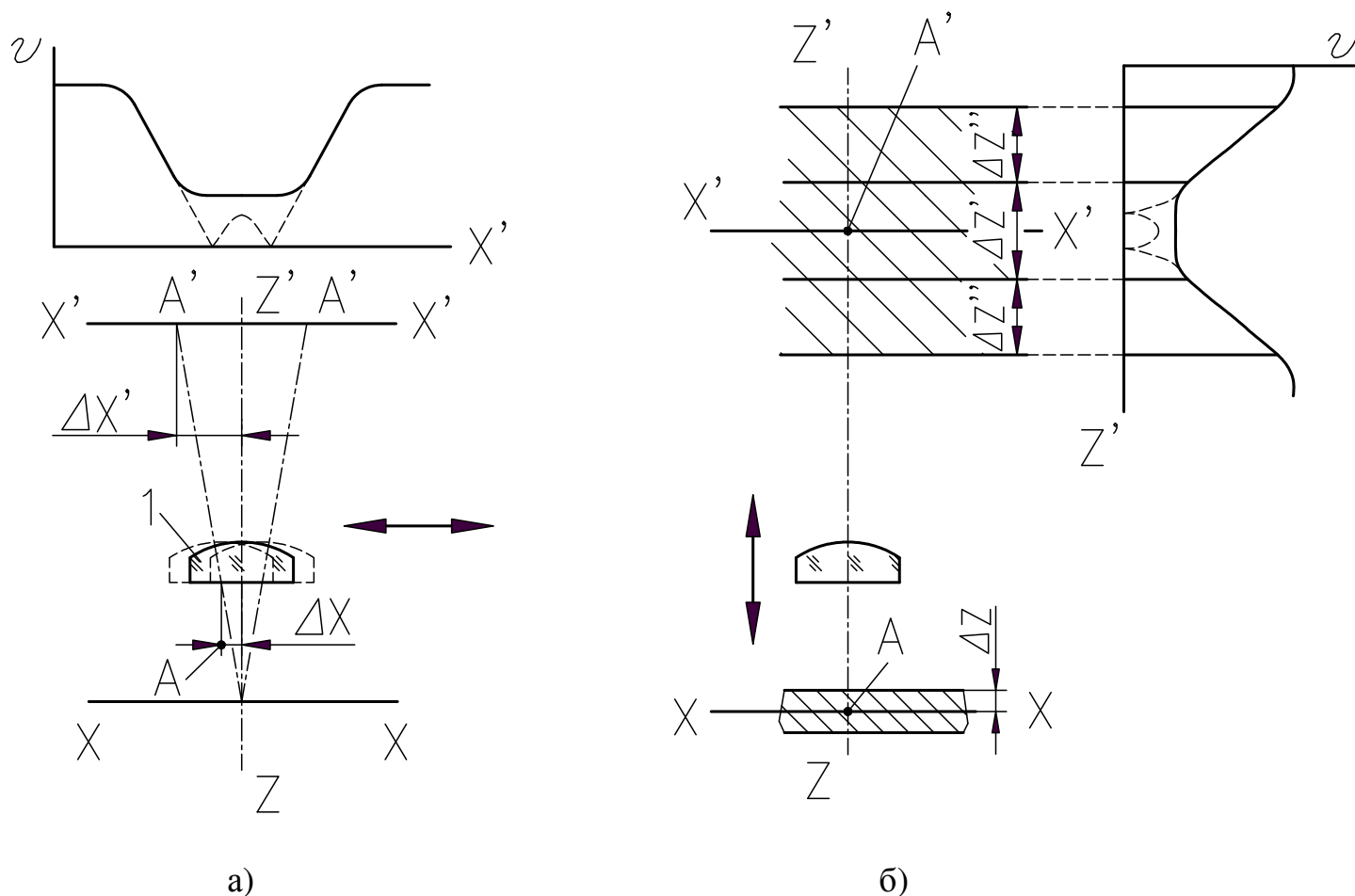


Рис. 7.1. Схемы совмещения объекта по осям X, Y, Z

На рис. 7.1б показана установка по оптической оси точки A на резкое изображение. Глубине резкого изображения в пространстве предметов ΔZ соответствует глубина в пространстве изображения $\Delta Z'$, равная

$$\Delta Z' = \Delta Z(\beta^2 - 1), \quad (7.1)$$

где β – увеличение оптической системы.

Если при наводках в плоскости, перпендикулярной к оптической оси, оператор постоянно контролирует положение предмета, то при установке вдоль оптической оси часто бывают случаи, когда изображение предмета в плоскости изображения даже в нерезком виде оператором не наблюдается. Только, когда в зоне $\Delta Z''$ (её называют зоной нерезкого изображения)

появляется малоконтрастное, нерезкое изображение предмета, оператор замедляет движение системы 2 и производит точную установку изображения предмета в пределах зоны разброса $\Delta Z'$. Величина зоны нерезкого изображения $\Delta Z''$ сильно зависит от контраста и величины объекта и примерно в 10 – 20 раз больше глубины резкого изображения.

Некоторые механизмы для перемещения линз показаны на рис. 7.2. В микрообъективе (рис. 7.2а) компенсация ошибок центрирования производится перемещением линзы 1 с оправой, установленной в корпусе с радиальным зазором, с помощью винта 2 перемещением линзы в плоскости, перпендикулярной к оптической оси, устраняют ошибки изготовления и добиваются требуемого качества изображения. Контроль результатов перемещения линзы производят по дифракционной точке, расположенной в плоскости предмета и наблюдаемой в окуляр.

Конструкция механизмов, служащих для перемещения оптических систем вдоль оптической оси при фокусировании резкого изображения, показана на рис. 7.2б, в и г.

На рис. 7.2б показано устройство, в котором изображение объекта после объектива, не показанного на рисунке, светоделительной призмой 1 и системой 2 проектируется на экран приёмника, а также в плоскость сетки 3. Наблюдение сетки производится через окуляр 4. Фокусирование изображения производится одновременным перемещением системы 2 и сетки 3 с окуляром 4 с помощью сцепленных конических шестерен. Для компенсации недостатков глаза окуляр 4 может перемещаться по резьбе вдоль оптической оси при вращении втулки 5. Величина перемещения X окуляра с фокусным расстоянием f' определяется по формуле

$$X = \frac{Nf'^2}{1000} \text{ мм,} \quad (7.2)$$

где N – аметропия глаза в диоптриях.

Как правило, окуляры имеют смещение ± 5 дптр. Обычно втулку 5, на которой наносится шкала, поворачивают не более чем на 300° . Поэтому для перемещения окуляров используют многоходовую резьбу.

На рис. 7.2в приведена конструкция панкратической системы, позволяющей плавно менять увеличение в пределах $2,4^x$ при совместном перемещении линз 1 и 2. Конструкция механизма должна обеспечивать при перемещении линз минимальное отклонение их от соосности относительно оптической оси (в пределах 0,005 – 0,01 мм). С этой целью оправы линз имеют общую базовую поверхность (диаметр 30 мм). При этом посадочный диаметр под неподвижную линзу 3 растачивается в оправе 4 (см. рис. 7.2г), установленной на корпус 5, при установке детали на

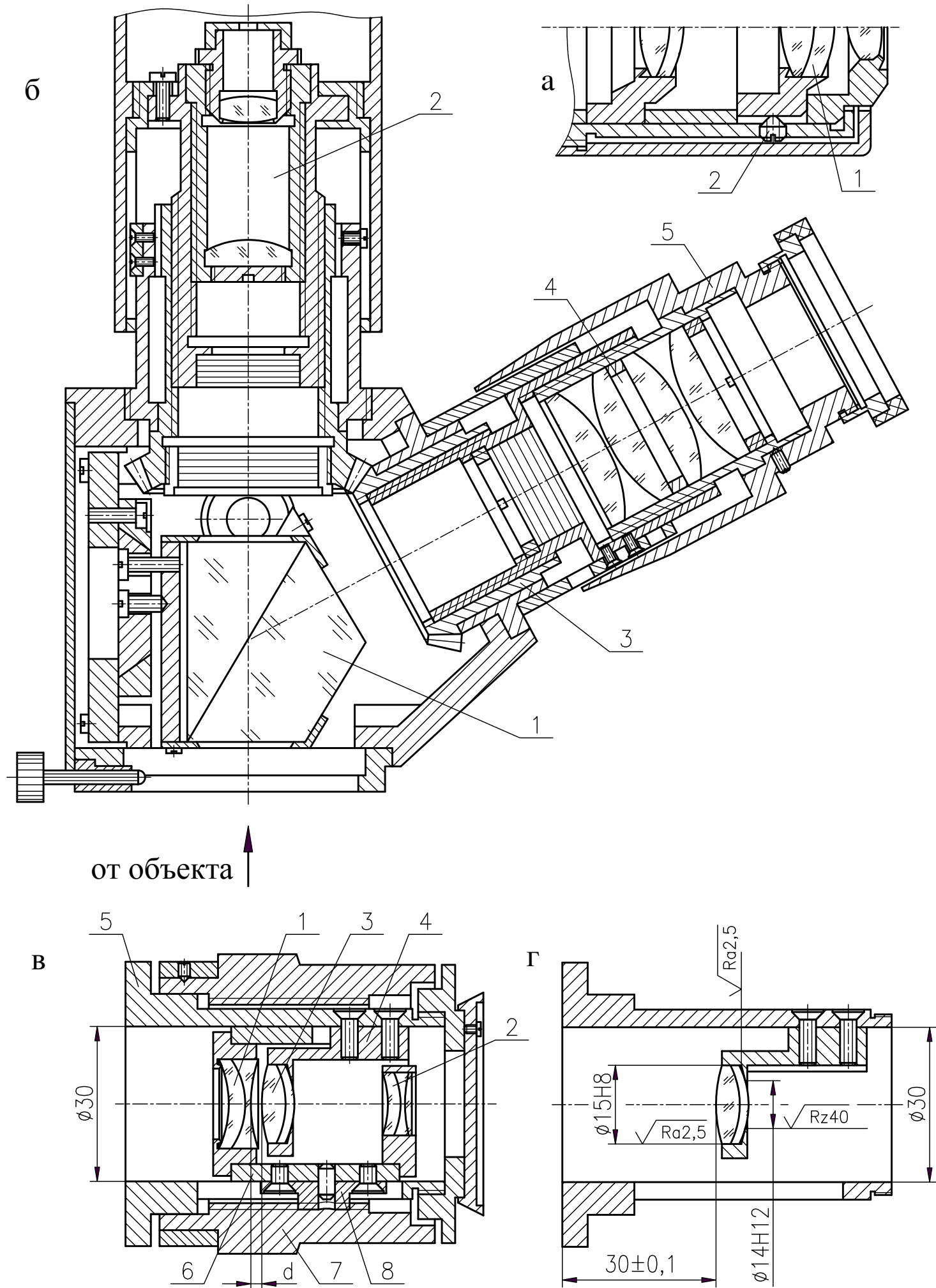


Рис. 7.2. Механизмы для перемещения линз

базовом диаметре. После расточки оправка 4 не снимается больше с корпуса 5. Перемещение подвижных линз 1 и 2, оправы которых установлены в общей оправе 6, имеющей на конце паз под оправу 4, осуществляется вращением втулки 7, снабженной многозаходной резьбой. Втулка 7 через шпонку 8, имеющую на своей поверхности такую же резьбу, сообщает поступательное движение оправе 6. Масштаб увеличения устанавливается по шкале 9.

Рассмотрим расчёт шкалы. На основании зависимостей, связывающих перемещение линз 1 и 2 относительно линзы 3 (изменение промежутка d), определено, что при изменении увеличения от 1 до $2,4^x$ через интервалы 0,2 промежутки d будут равны 0; 3,2; 6,0; 8,3; 10,4; 12,4; 14,2; 15,8 мм. Так как наружный диаметр оправы 6 равен 30 мм, то при высоте шпонки 8, равной 5 мм, диаметр резьбы во втулке 7 составит 40 мм. Поскольку угол поворота шкалы 9 не должен превышать $330 - 360^\circ$, то резьба во втулке 7 должна обеспечивать перемещение оправы 6 не менее 15,8 мм за один оборот, т.е. быть многозаходной. По ГОСТ 5359–77 для окулярной резьбы диаметром 40 мм при $t = 1,5$ мм и числе заходов $K = 16$ ближайший ход резьбы $S = 24$ мм. Углы α делений шкалы определяются из соотношения $\alpha = d \times 360^\circ / Kt$. Отсюда следует, что деления нужно нанести через 0° ; 48° ; 90° ; $124^\circ 30'$; 156° ; 186° ; 213° ; 237° .

Для перемещения линз в подобных панкратических системах используются также реечно-зубчатые механизмы.

Конструкция двойной панкратической системы с перепадом увеличения 5^x , применяемая в стереоскопическом приборе и приводимая в движение двигателем, показана на рис. 7.3. Компонент 1 панкратической системы имеет линейное перемещение, а компонент 2 перемещается нелинейно. Линза 3 неподвижна. Компоненты 1 и 2 установлены в подвижных оправках 4 и 5, в которых установлены упоры 6. Упоры 6 входят в спиральные пазы, выполненные в цилиндрическом кулачке 7, который вращается на корпусе 8 с помощью шестерни 9. Шестерня 9 получает вращение от мотора 10 через червяк 11, шестерни 12 и 13.

Изменение направления движения компонентов 1 и 2 производится реверсом мотора. Для исключения повреждения механизма шестерня 12 установлена на оси через фрикционную муфту.

Механизмы для транспортировочного перемещения выполняют функцию «включено – выключено» и используются для ввода или вывода из хода лучей зеркал, призм, линз и других оптических деталей и систем. Чаще всего применяют поступательное или вращательное движение. Обычно транспортировочные механизмы должны обеспечивать точную установку оптических деталей только в положении «включено», что достигается применением различных конструкций упоров, фиксаторов, стопоров и других деталей аналогичного назначения. Конструкции транспортировочных механизмов с вращательным движением достаточно широко известны, поэтому здесь приведены механизмы с поступательным

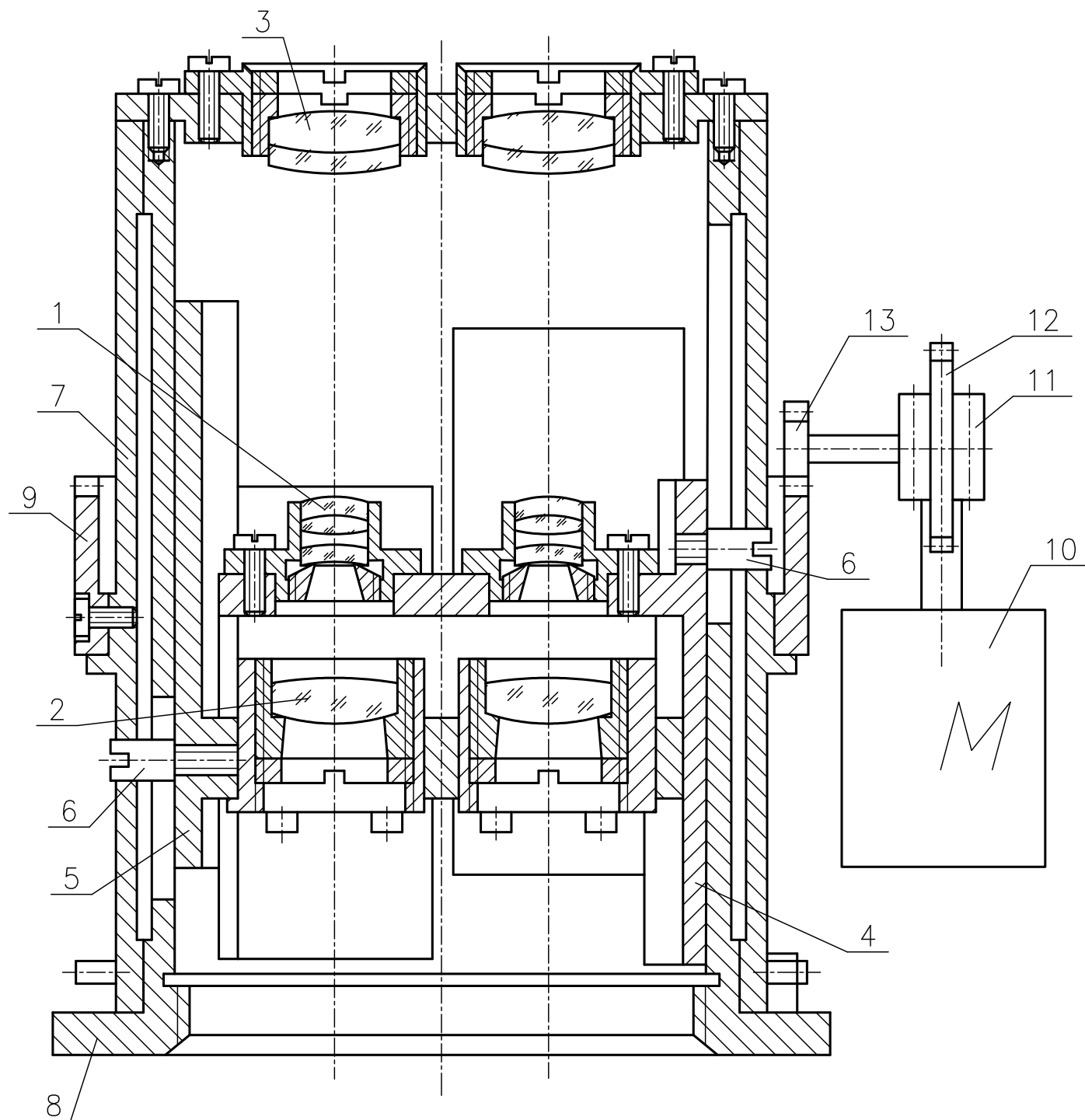


Рис. 7.3. Конструкция двойной панкратической системы

движением деталей.

На рис. 7.4а дана конструкция для переключения объективов 1 и 2, установленных на направляющей 3 и переключаемых рукояткой 4. Совпадение осей объективов с оптической осью прибора обеспечивается регулировкой упоров 5. Через сквозное отверстие 6 можно увидеть цифры, показывающие увеличение объективов.

На рис. 7.4б приведено устройство для переключения трёх призм 1, 2 и 3, используемых в схеме сравнения. Призмы установлены на герметик на

платах 4 и 5, которые перемещаются с помощью направляющей 6. Положение призм определяется фиксаторной планкой 7, имеющей четыре паза, координаты которых связаны с расположением призм (один из пазов позволяет устанавливать в поле зрения линию раздела склеенных призм 2 и 3). Фиксация положения производится с помощью пружинного фиксатора 8, который входит в пазы.

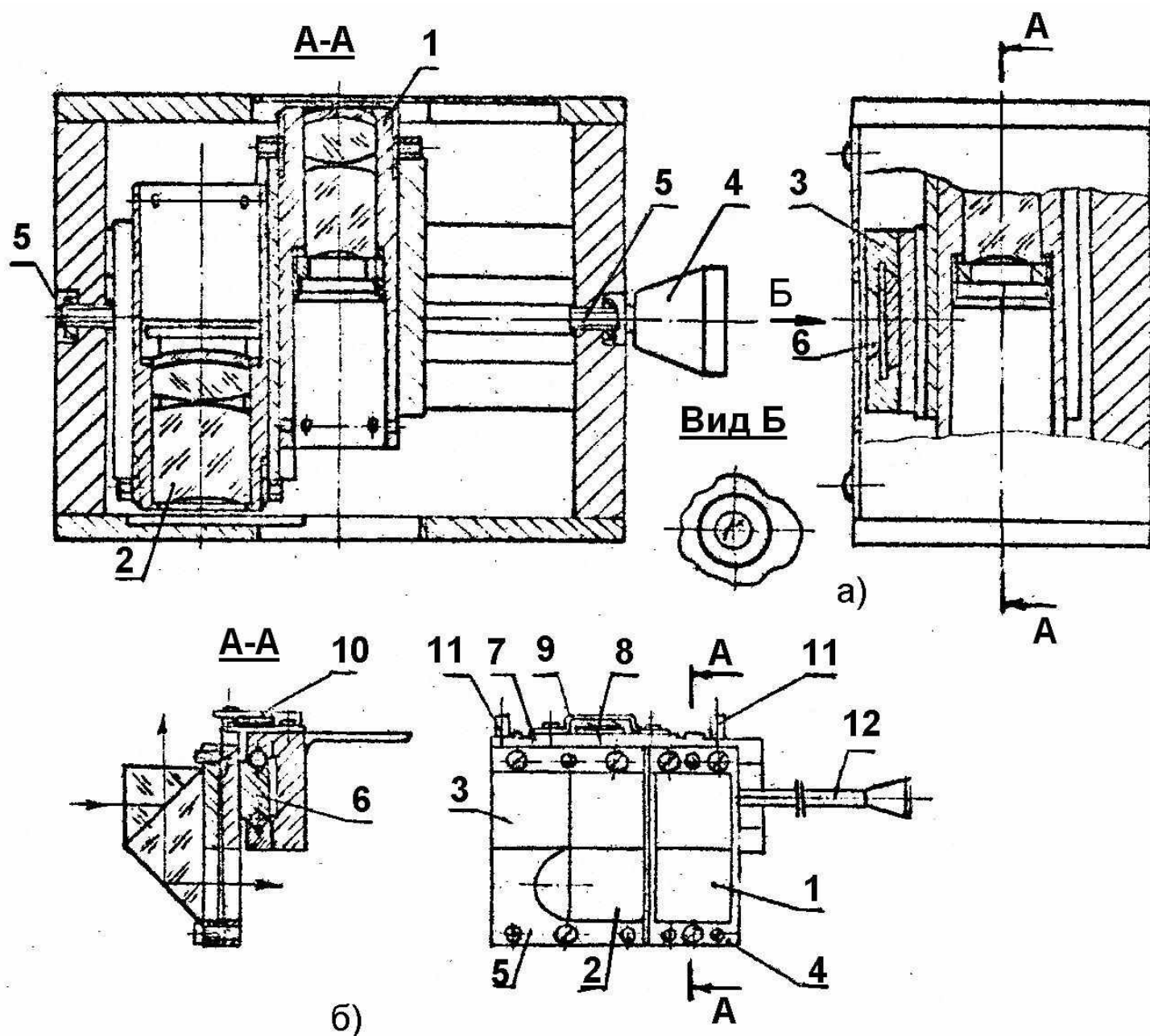


Рис. 7.4. Механизм переключения объективов и призм

Угольник 9 имеет выступ 10, который ограничивает крайние перемещения призм, упираясь в упоры 11. Переключение призм производится рукояткой 12.

Глава 8. Юстировочные механизмы оптических приборов

Юстировкой (от лат. *justus* – правильный) называется процесс, обеспечивающий доведение свойств СЧ или ОП до заданных технических требований. Теория юстировки ОС подробно рассмотрена в отдельных монографиях. Здесь мы остановимся главным образом на конструкциях юстировочных устройств, в том числе и используемых при работе на ОП. Юстировка проводится во время сборки ОП или при его эксплуатации и её возможность должна учитываться при разработке прибора. Юстируемое свойство (освещённость, степень резкости изображения, центрирование системы, точность и воспроизводимость и т.д.) сравнивают с заданным значением и с помощью юстировочных устройств, механизмов и иных способов стремятся достигнуть требуемой характеристики. Изменение свойства должно быть целенаправленным, желательно независимым от других и достаточно быстро вести к требуемому результату (независимая, определённая юстировка каждого отклонения).

Основные характеристики юстировочных процессов и юстировочных устройств приведены в табл. 8.1.

Поясним отдельные понятия, использованные в таблице. Производственная юстировка выполняется при изготовлении и ремонте ОП и обеспечивает функционирование приборов в пределах заданных требований.

Эксплуатационная юстировка производится потребителем и связана обычно с условиями использования ОП. К ней относится, например, наводка на резкость в фотоаппаратах, установка необходимой длины волны в спектральных приборах, настройка осветительной системы в микроскопах и т.п. Механизмы, используемые для эксплуатационной юстировки, ввиду их важности в устройстве ОП, описаны в отдельных главах (см., например, гл. 5,7) и в технической литературе.

Фокусирующие функции механизмов, указанные в п. 2.1.1 таблицы, осуществляются обычно путём продольных подвижек деталей и узлов оптических систем. Фокусирование изображения может осуществляться перемещением объекта, оптической системы или плоскости, в которую оптической системой проецируется изображение вдоль оптической оси. Если в ходе лучей установлены зеркальная или призмённая системы, то фокусирование может осуществляться и их перемещением.

Рассмотрим часто встречающиеся случаи фокусирования изображения с помощью продольного перемещения линзовой системы или зеркала. На рис. 8.1а, б сплошными линиями обозначен ход лучей между сопряжёнными точками T и T' при исходном положении линзы или зеркала, а штрихами – ход лучей между сопряжёнными точками T и T' после смещения линзы на некоторую величину $\Delta X_л$ или зеркала на величину $\Delta X_з$.

Таблица 8.1

Характеристика	Содержание признака
Область использования	1.1. Производственная 1.2. Эксплуатационная
Выполняемые юстировочные функции	2.1. Геометрические: установка оптических деталей и узлов в нужное положение в соответствии с требованиями геометрической оптики 2.1.1. Фокусирование изображения, устранение параллакса шкал и сеток, регулировка масштаба изображения и увеличения оптических систем 2.1.2. Центрирование, устранение наклона изображения, срезания поля зрения или зрачков 2.1.3. Ориентирование изображения, шкал, сеток и т. п. или траектории их перемещения в поле зрения 2.1.4. Обеспечение качества изображения (коррекция сферической и других аберраций, устранение натяжений оптических деталей и т.д.) 2.2. Функциональные: обеспечение требований, вытекающих из назначения и функционирования прибора и связанных с принципами действия прибора, определяемыми часто физической оптикой (например, изменение расстояния между интерференционными полосами и их поворот, юстировка кассетной части спектральных приборов, центрирование фазовых колец в фазовоконтрастных микроскопах и т.д.)
Надёжность	Сохранение положения оптических деталей и узлов во времени при различных видах воздействий: механических, тепловых, климатических и пр. Воспроизводимость измерений, разрешающей способности и т.п.

Продолжение табл. 8.1

Характеристика	Содержание признака
Приёмы выполнения	4.1. Зависимое и независимое (принцип суперпозиции) воздействие на оптическую деталь или узел 4.2. Перемещение в прямоугольных координатах по осям X, Y и Z и поворот вокруг этих осей или перемещение в полярных координатах 4.3. Установка деталей и узлов в пространстве 4.3.1. Постоянная юстировка обеспечивается технологической пригонкой путём снятия материала деталей, склеиванием, установкой прокладок, шайб или комплектованием деталей и узлов (обычно используется при производственной юстировке или в условиях больших внешних воздействий) 4.3.2. Регулируемая юстировка допускает перемещение деталей и узлов с помощью различных устройств
Управление	5.1. Ручное 5.2. Автоматизированное 5.3. Прямое 5.4. С обратной связью
Технологичность	6.1. Эксплуатационная: простота и удобство настройки прибора, обеспечение требуемой точности измерений и т.д. 6.2. Конструктивная: простота и рациональность схем и конструкции, наименьшее число деталей, расчленение механизмов на автономные узлы, унификация, учет серийности выпуска, ремонтоспособность, применение простых форм деталей, обоснованная простановка размеров, рациональный выбор баз и т.д.

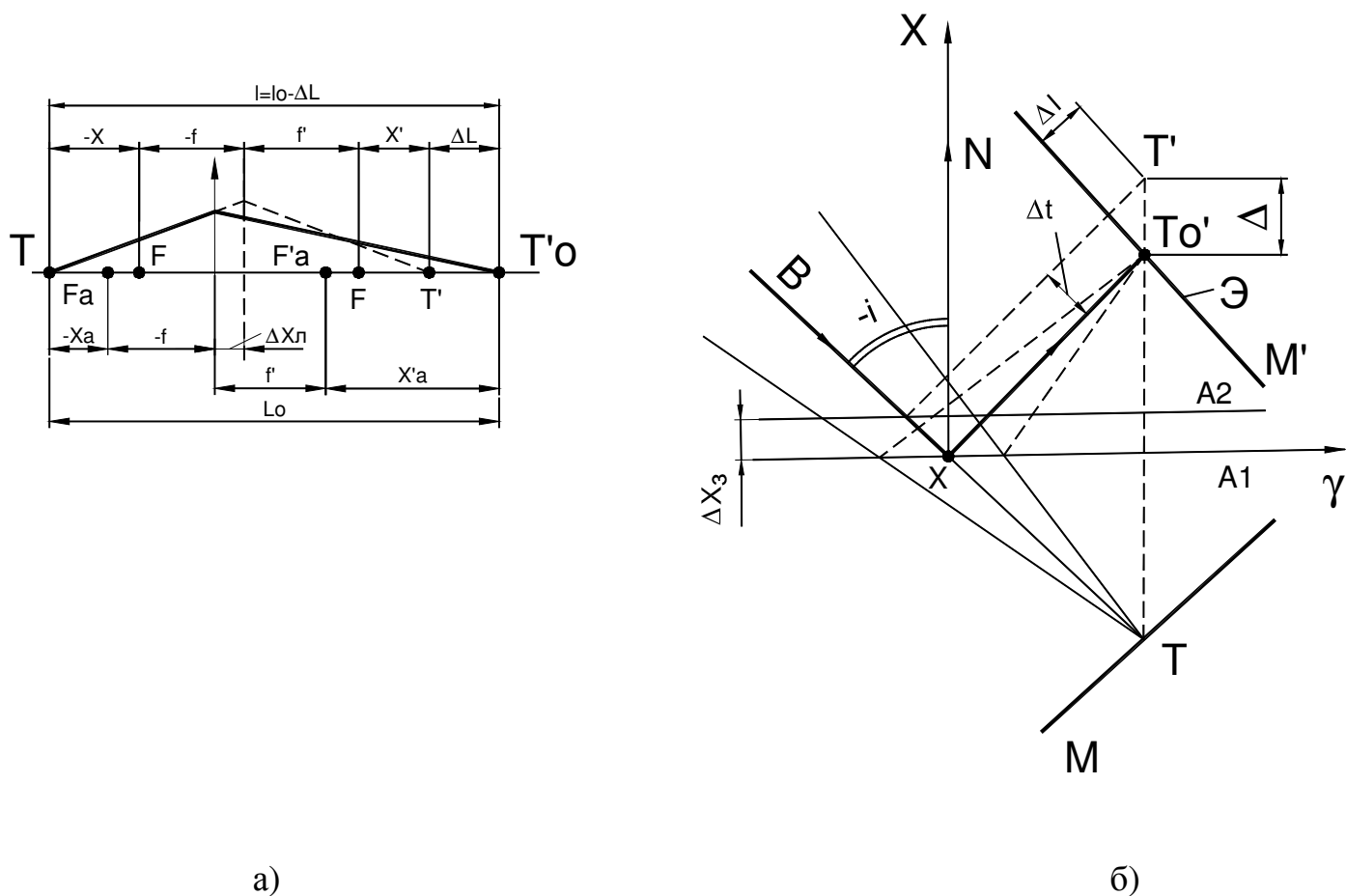


Рис. 8.1. Способы фокусирования изображения

Связь между перемещением линзы $\Delta X_{\text{л}}$ и смещением плоскости изображения Δl определяется зависимостью

$$\Delta l = (1 - V_o V) \times \Delta X_{\text{л}}, \quad (8.1)$$

где V_o , V – увеличение линзы соответственно в исходном и смещённом положениях.

Обычно V мало отличается от V_o .

Для фотообъектива, когда $|V_o| \ll 1$, из формулы (8.1) следует, что $\Delta l \approx \Delta X_{\text{л}}$, а для микрообъектива, когда $|V_o| \gg 1$, $\Delta l \approx -V^2 \Delta X_{\text{л}}$.

При смещении зеркала (см. рис. 8.1б) из положения A_1 в положение A_2 происходит расфокусировка Δl на величину

$$\Delta l = 2\Delta X_3 \times \cos i, \quad (8.2)$$

где i – угол падения луча,

Δt – сдвиг изображения, равный

$$\Delta t = 2\Delta X_3 \times \sin i. \quad (8.3)$$

Параллаксом называют несовпадение плоскости изображения с плоскостью шкалы, сетки или другой метки в поле зрения. Наличие параллакса в приборе вызывает смещение изображения относительно метки при перемещении глаза наблюдателя в пределах выходного зрачка. Причинами появления параллакса служат:

- смещение плоскости сетки относительно фокальной плоскости объектива, в которой формируется действительное изображение предмета (см. рис. 8.2а);
- неправильная установка или перемещение зеркал и призм в сходящемся ходе лучей (см. рис. 8.2б);
- погрешности обработки оптических деталей, например, сферичности защитного стекла и призмы (см. рис. 8.2в).

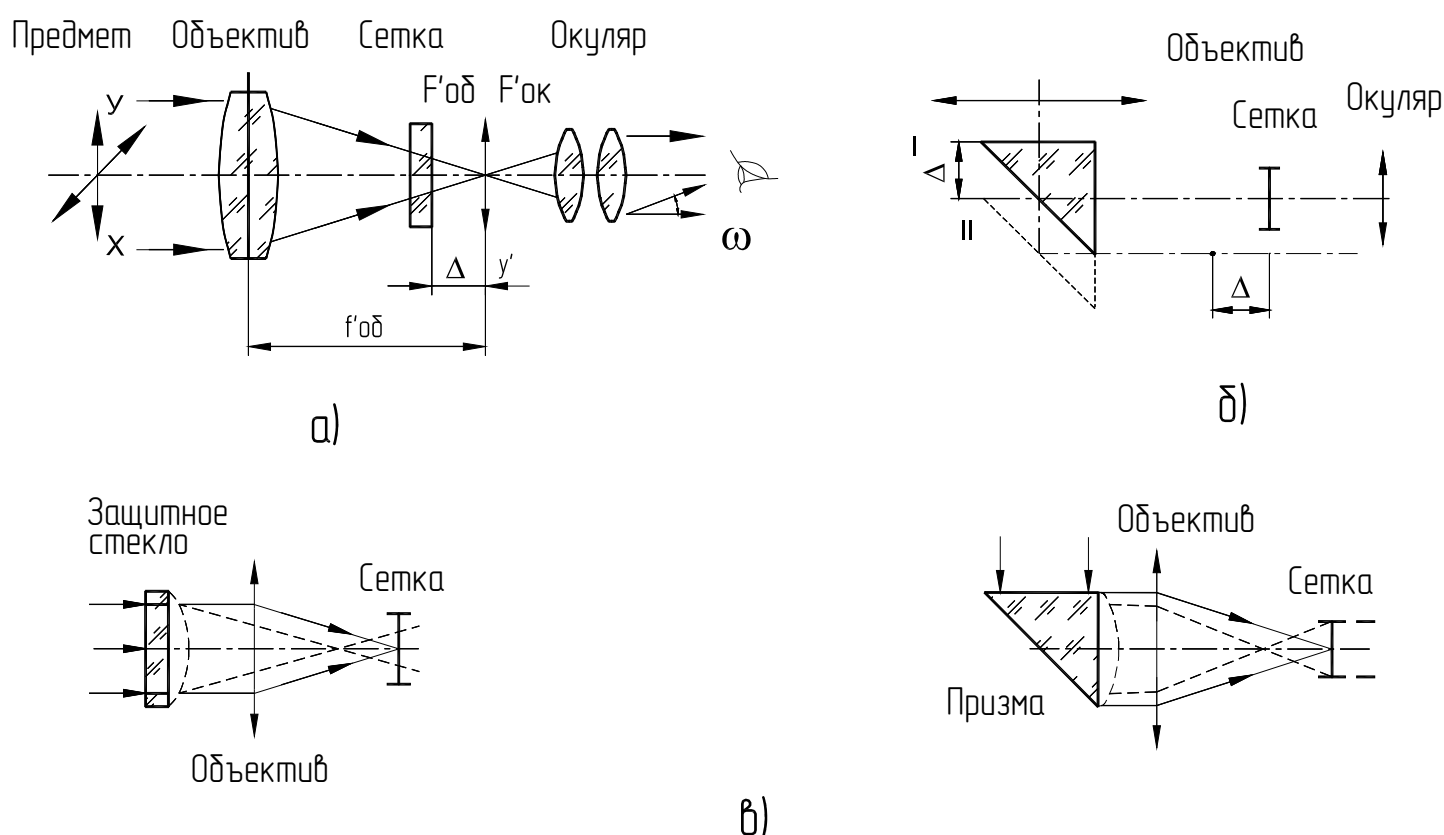


Рис. 8.2. Параллакс

Наклон сетки или объектива приводит к параллаксу на краях поля, значительные aberrации оптических систем также вызывают параллакс. Юстировка увеличения и масштаба изображения оптических систем проводится обычно у отсчётных и измерительных микроскопов, в зрительных трубах, оптических системах станков, измерительных проекторах и других оптических приборах аналогичного назначения. Например, в измерительных микроскопах допустимое отклонение величины изображения не должно превышать $\pm 0,0005$ мм.

Заданное увеличение в плоскости действительного промежуточного изображения, в которой устанавливают сетки, шкалы и другие метки измерительных микроскопов, достигается обычно изменением длины тубуса (оптического интервала) Δ или фокусного расстояния микрообъектива. Как известно, увеличение объектива определяется формулой

$$V_{об} = \frac{Y'}{Y} = \frac{\Delta}{-f'} = \frac{f'}{X} = \frac{a'}{a}, \quad (8.4)$$

где Y, Y' – величина предмета и его изображения,
 X – расстояние от переднего фокуса объектива до плоскости предмета,
 a, a' – передний и задний отрезки объектива.

Из этой формулы, задав значения допуска на отклонение увеличения δV , можно определить пределы изменения длины тубуса $\delta\Delta$ и фокусного расстояния $\delta f'$, которые соответственно равны

$$\delta\Delta = \Delta \frac{\delta V}{V}, \quad \delta f' = -f' \frac{\delta V}{V}. \quad (8.5)$$

В проекционных системах часто используются сменные объективы. При этом положение предмета (например, измеряемой шкалы) и его изображения (шкалы в отсчётной системе) остаётся постоянным. Поэтому для изменения увеличения используют перемещение объектива, например, с помощью подрезки опорного торца промежуточного кольца. Необходимая величина перемещения объектива

$$\delta x' = x' \frac{\delta V}{V}, \quad (8.6)$$

где x' – расстояние от заднего фокуса объектива до плоскости изображения.

Изменение увеличения в телескопических системах достигается изменением фокусного расстояния $\Delta f'$ объектива за счёт изменения промежутка Δd между линзами объектива или перемещением коллектива. При подрезке кольца между компонентами объектива изменение фокусного расстояния составит

$$\Delta f' = \Delta d \frac{f_1^2}{f_1' f_2'}, \quad (8.7)$$

где f' , f_1' f_2' – соответственно задние фокусные расстояния объектива и его двух компонентов.

Фокусное расстояние коллектива принимают в K раз больше фокусного расстояния объектива. Поэтому при перемещении коллектива Δd изменение фокуса

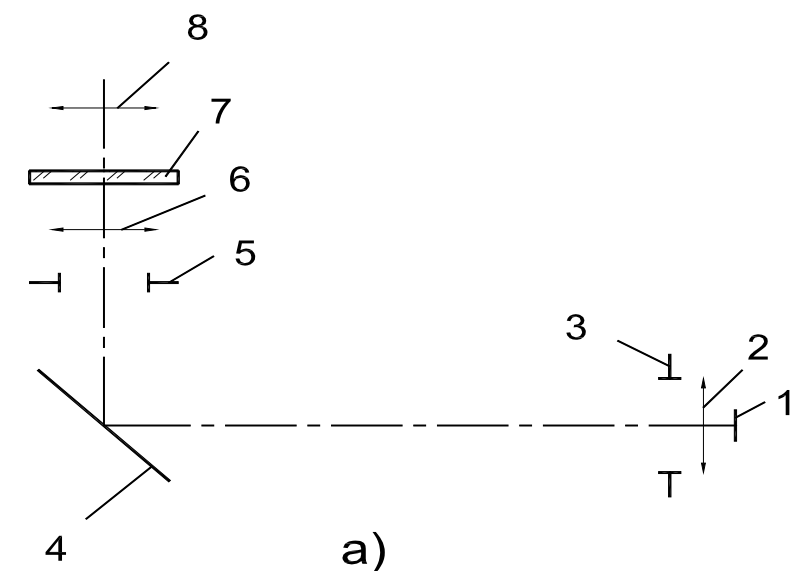
$$\Delta f' = \frac{\Delta d}{K}. \quad (8.8)$$

Центрирование оптических приборов служит для установки узлов в заданное положение относительно конструкторских баз в плоскости, перпендикулярной к оптической оси. В конструкции оптических приборов обычно предусматриваются следующие виды центрировочных операций: центрирование одиночных линз, шкал, сеток и т.п.; центрирование одиночных линз в оправках; центрирование отдельных узлов (объективов, окуляров, окулярных насадок и т.п.); центрирование зрительных труб и коллиматоров.

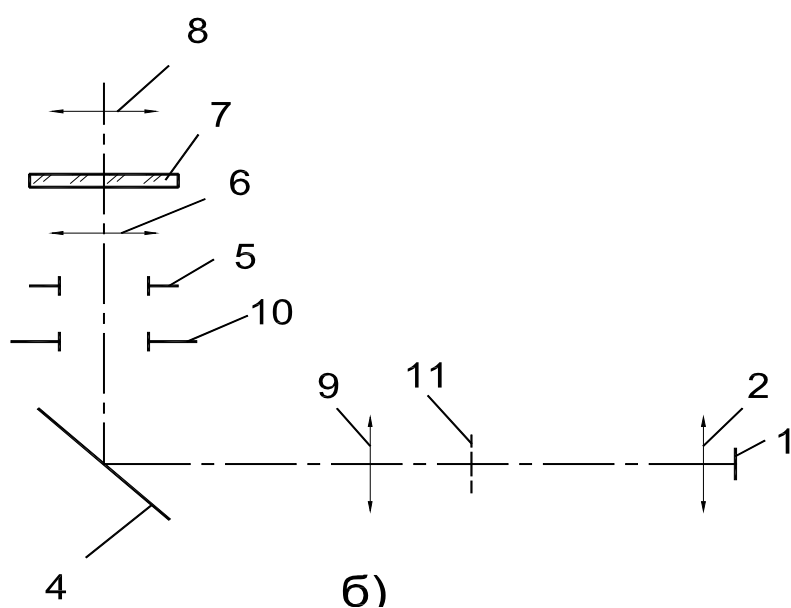
Центрирование оптических приборов и устранение срезания поля зрения или зрачков достигаются с помощью поперечных сдвигов линзовых систем или с помощью сдвигов и наклонов отражающих поверхностей.

Рассмотрим в качестве примера эволюцию эксплуатационной юстировки центрирования осветительной системы микроскопа. Для создания наилучших условий освещения необходимо произвести центрирование нити источника света или её изображения и центрирование диафрагмы, ограничивающей поле зрения (полевой диафрагмы). Оба этих требования связаны с функциональными свойствами микроскопа (смена ламп, создание косого освещения препарата, уменьшение рассеянного света), с устранением погрешностей изготовления ламп, деталей осветительной системы, устройств для установки микрообъективов, которые могут давать смещения изображения полевой диафрагмы до половины поля зрения, и с другими причинами.

На рис. 8.3а показана в общем виде осветительная система микроскопов, которая использовалась до 80-х годов прошлого века. Отдельные её оптические СЧ заменены главными плоскостями. Нить накала источника света лампы 1 коллектором 2 проектируется в апертурную диафрагму 5 конденсора 6, который изображает полевую диафрагму 3 в плоскость предмета 7, которая рассматривается с помощью объектива 8. Зеркало 4 изменяет направление светового пучка, что обеспечивает оптимальную компоновку прибора.



а)



б)

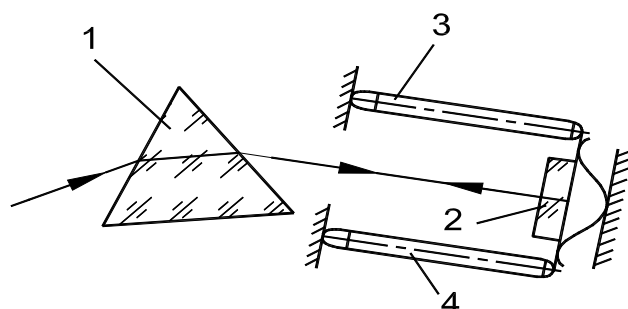


Рис. 8.3.

Центрирование осветительных систем микроскопов

Рис. 8.4.

Температурный компенсатор

Для получения косого освещения объекта нить лампы 1 и апертурная диафрагма должны смещаться с оптической оси не менее чем на 0,5 диаметра диафрагмы. Центрирование лампы при её замене осуществляется также перемещением нити лампы. Смещение нити лампы при этом может достигать половины её размера.

Центрирование полевой диафрагмы 3 в пределах 5...10 мм обеспечивалось перемещением самой диафрагмы или с помощью качания зеркала 4, или его перемещением вдоль оптической оси. Последнее решение более рационально, поскольку зеркало расположено ближе к оператору и его детали не нагреваются. В то же время центрировочные

рукоятки полевой диафрагмы иногда нагреваются до 40 – 50°С. Юстировка зеркала 4 почти не влияет на смещение нити лампы 1.

Позднее эта схема подверглась модернизации (рис. 8.3б), при которой в неё был введён коллектив 9. Действительная ирисовая полевая диафрагма 10 расположена, в целях удобства пользования, над зеркалом 4. В этой схеме коллектор 2 проектирует нить лампы 1 в промежуточную плоскость 11, расположенную вблизи коллектива 9, который сопрягает оправу коллектора 2 с полевой диафрагмой 10. В этом варианте схемы центрирование полевой диафрагмы производится перемещением конденсора 6 вместе с диафрагмой 5. По такому варианту центрирование конденсора выполняется потребителем при необходимости.

Из примера видно, что при анализе и выборе эксплуатационного варианта центрирования следует проанализировать последовательно результаты, к которым приведет перемещение элементов схемы и, при необходимости, с помощью введения новых СЧ обеспечить удобное пользование прибором.

Ориентирование изображения шкал, сеток и других подобных деталей или траекторий их перемещения в поле зрения осуществляется обычно с помощью поворота отражающих систем вокруг продольных осей (например, поворот призмы Дове, поворот зеркал в дальномерах фотоаппаратов и т.д.).

Юстировочные функции, помогающие избежать ухудшения качества оптического сигнала, поступающего в прибор, включают в себя в широком смысле все рассмотренные выше юстировочные функции. В узком значении к функциям устройств, обеспечивающим качество изображения, можно отнести те функции, которые касаются разрешающей способности или ЧКХ приборов, распределения освещённости в изображении объекта, уменьшения отдельных aberrаций и рассеянного света и т.п. Выполнение этих функций достигается введением в ход лучей компенсаторов, адаптивной оптики, а также центрированием деталей, установкой диафрагм и т.п.

Надёжность юстировочных механизмов характеризует сохранение их свойств (например, постоянство геометрического положения деталей в пространстве, разрешающей способности прибора и т.д.) в заданных условиях эксплуатации в течение требуемого промежутка времени.

Повышению надёжности оптических приборов значительно содействует использование нерасстраивающихся элементов и схем и применение узлов и схем, обладающих адаптивными свойствами. К числу нерасстраивающихся систем относятся, например, призмы с чётным числом отражений, у которых сохраняется постоянство угла между входящими и выходящими лучами при повороте призмы, биаксиальные коллиматоры и т.п.

Схема температурного компенсатора призмённого монохроматора показана на рис. 8.4. При изменении температуры среды изменяется

показатель преломления призмы 1, что приводит к смещению нуля градуировочной кривой. Компенсация смещения проводится дополнительным поворотом зеркала 2 с помощью стержней 3 и 4, изготовленных из материалов с различными коэффициентами линейного расширения.

Рассмотрим подробнее также приёмы выполнения юстировки.

Действие юстировочного механизма на оптическую деталь или систему может быть независимым, то есть таким, что выполнение какого-либо вида юстировки с помощью механизма не приводит к возникновению новых дефектов в работе прибора. При зависимой юстировке, наоборот, с устранением данного дефекта нарушается сделанная ранее юстировка или появляются новые ошибки.

Разрабатывая юстировочные механизмы, желательно обеспечивать возможность независимой юстировки, так как она делает возможным независимое и полное устранение отдельных дефектов и, как правило, уменьшает время юстировки. Зависимая юстировка выполняется методом последовательных приближений и она более трудоёмка, чем независимая.

Однако, конструкция юстировочных механизмов в этом случае более простая, так как требует меньшей детализации функций.

Перемещение юстируемых деталей и узлов может осуществляться в прямоугольных или полярных координатах. Чаще всего используют перемещения в прямоугольных координатах, позволяющие с помощью поступательного движения по трём осям и поворота вокруг них выполнить установку необходимого элемента в любой точке пространства.

Юстировка оптических элементов может обеспечивать их постоянную или регулируемую установку. Постоянная установка обеспечивается технологическими пригонками опорных поверхностей деталей, установкой прокладок или шайб, а также комплектованием деталей и узлов и используется обычно в тех случаях, когда требуется высокая точность юстировки, надёжность её сохранения, например, при смене узлов или вследствие внешних воздействий. В последнее время используется постоянная юстировка, при которой предварительно с помощью регулируемого юстировочного устройства производится необходимая установка юстируемой СЧ, которая закрепляется в приборе с помощью клея, герметика или другого подобного материала. После окончания юстировки регулируемое юстировочное устройство удаляется. Такая методика юстировки обеспечивает надёжную установку СЧ при простой конструкции установочных устройств, в которых отсутствуют регулировочные элементы.

Регулируемая установка допускает перемещение деталей и узлов с помощью различных механизмов – винтовых, рычажных, клиновых, зубчатых и т.д. Как правило, она является обязательной для тех видов юстировки, которые выполняются потребителем ОП (наводка фотоаппарата, фокусирование микроскопа, установка длины волны в спектральных приборах и т.п.).

Юстировка приборов в большинстве случаев выполняется юстировщиком вручную. Однако в последние годы ОП, используемые в космосе, лабораториях с повышенной радиоактивностью и других подобных случаях, используют автоматическую или автоматизированную юстировку. Например, в космических телескопах система автоматической фокусировки вторичного зеркала включает фотоэлектрический датчик угловых и линейных смещений и приводы для угловых разворотов и линейных перемещений.

Рассмотрим конструкции отдельных юстировочных механизмов.

Схема устройства малоформатного фотоаппарата показана на рис. 8.5. Объектив 1 проецирует фотографируемый объект в фокальную плоскость Б, где располагается фотоплёнка 3. Смещение этой плоскости не должно превышать 0,02мм. Фокусирование изображения, а также устранение перекоса опорных поверхностей объектива А и плёнки В проводят фрезерованием и шлифованием полозков на поверхности Б корпуса и подбором прокладки 2.

Конструкция узла шкалы катетометра показана на рис. 8.6. Узел состоит из следующих основных деталей: миллиметровой шкалы 3, защитного стекла 4, крышки 2, оправы 8, юстировочных винтов 1, 5, 7, 11, пружинных упоров 9, 12 и 13, неподвижного упора 6 и крепёжных винтов 10, служащих для закрепления оправы на корпусе прибора. С помощью винтов 11 устанавливают ось делений шкалы параллельно движению каретки с допуском 30", а с помощью винтов 5 устраняют параллакс изображения штрихов, который не должен превышать 0,5 дптр.

Конструкция проекционного объектива универсального измерительного микроскопа приведена на рис. 8.7. В этом микроскопе допустимые отклонения линейного увеличения объективов 3, 5 и 10^x не должны превышать $\pm 0,0005$ мм.

Установку линейного увеличения проводят с помощью контрольной образцовой шкалы подрезкой торца установочных колец 1.

Одним из распространенных способов центрирования линзовых систем в оправках является растачивание посадочных диаметров под линзы и протачивание посадочного диаметра и опорных торцов оправы за одну установку. При этом проводится и закатка линзы в оправу с контролем центрирования по блику. Возможен и другой вариант центрирования, когда сначала линзу завальцовывают, затем смещением оправы в центрированном патроне устраняют биение изображения. Далее протачивают диаметр оправы и её опорные торцы.

Обычно эти способы обеспечивают точность центрирования линз в пределах от 0,003 до 0,01мм в зависимости от используемого метода контроля центрирования, точности станка и квалификации рабочего.

У окуляров микроскопов центрирование главной линзы 1 (рис. 8.8) осуществляют перемещением оправы 2 по торцу кольца 3. Предварительно канавку 4 кольца 3 заполняют герметиком. После центрирования проводят

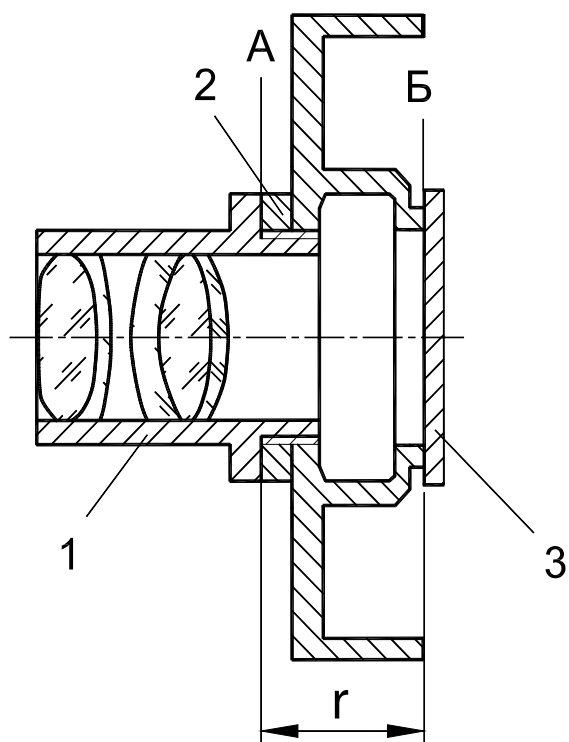


Рис. 8.5. Юстировка фотоаппарата

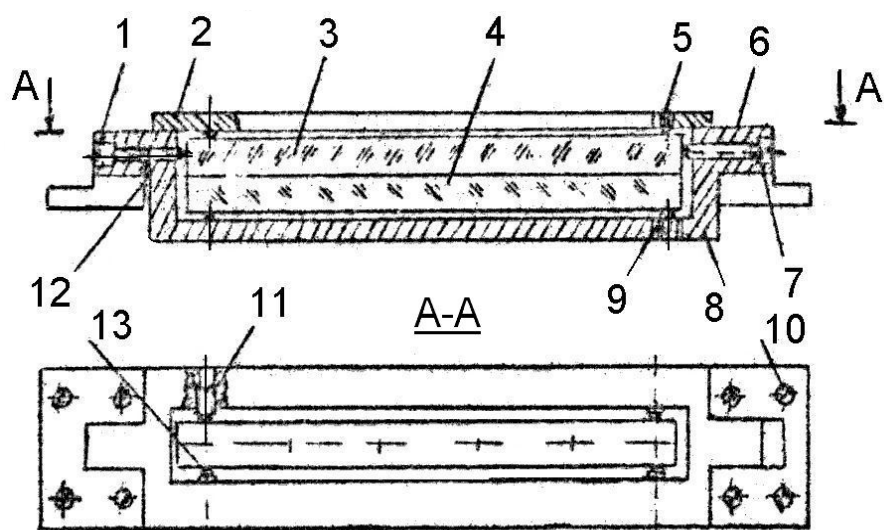


Рис. 8.6. Юстировка шкалы катетометра

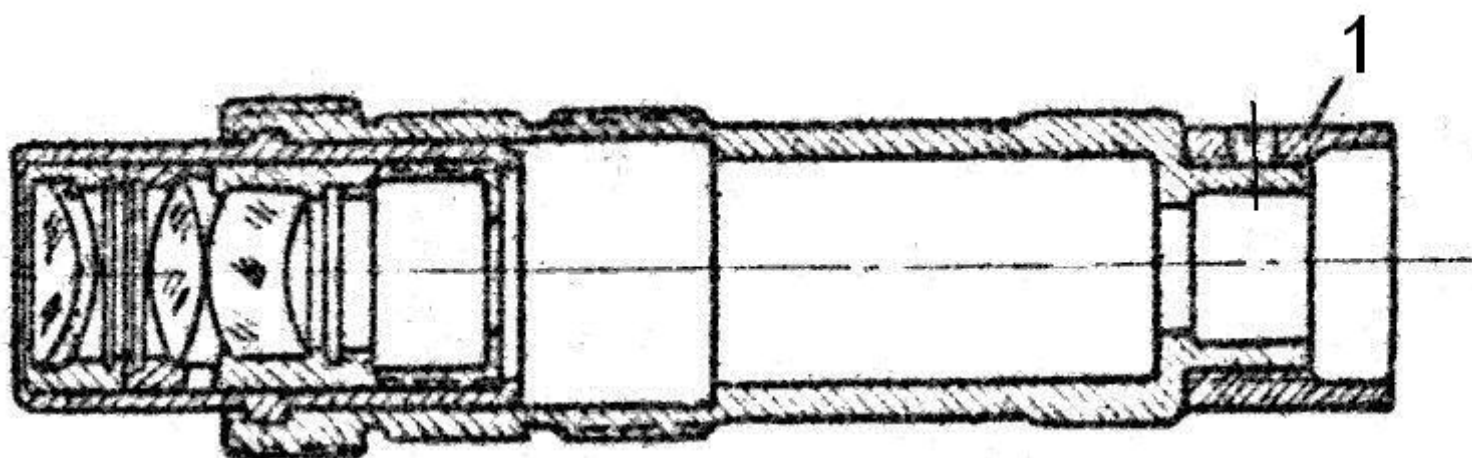


Рис. 8.7. Юстировка увеличения объектива

сушку окуляра.

Центрирование шкал, сеток, отдельных линз объективов часто выполняют с помощью винтовых, кулачковых и других механизмов, позволяющих совместить оптические оси с точностью до 0,001 – 0,003 мм.

На рис. 8.9 приведена конструкция угломерной окулярной головки, в которой центрирование угловой шкалы 1 осуществляется четырьмя винтами 2, а центрирование сетки 3 – винтами 4.

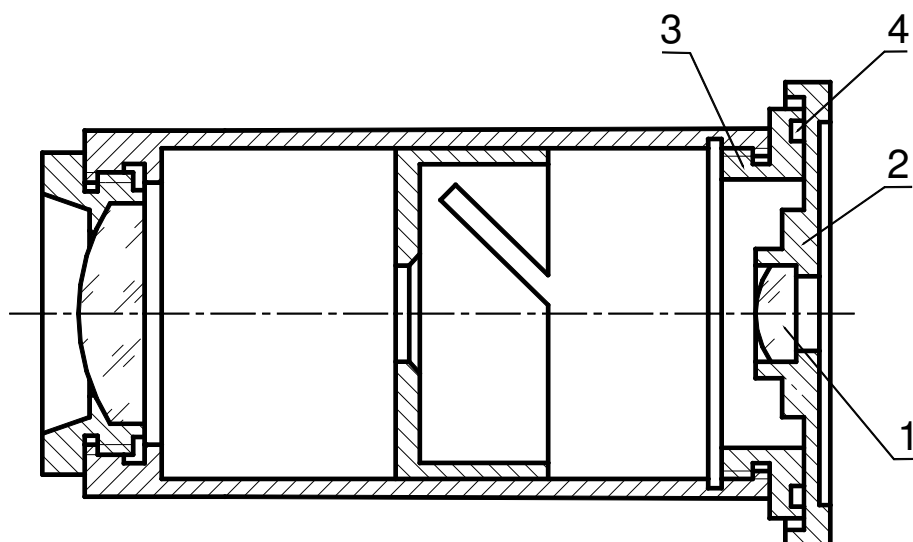


Рис. 8.8. Центрирование глазной линзы окуляра

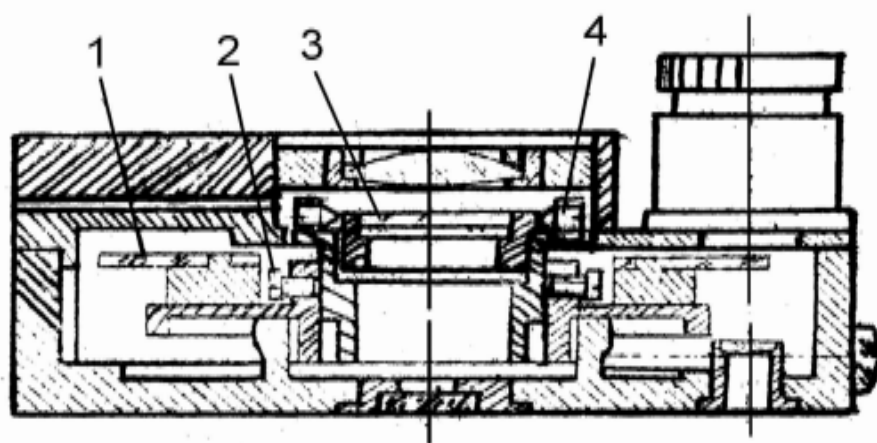


Рис. 8.9. Центрирование в угломерной головке

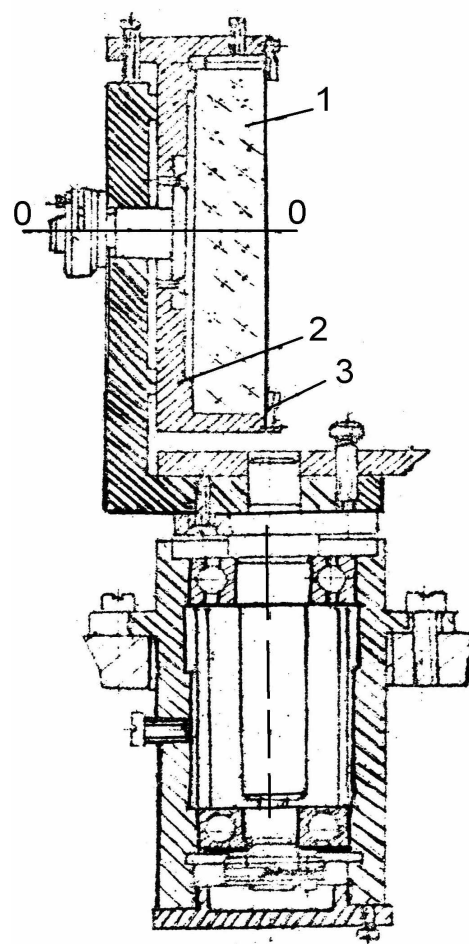


Рис. 8.10. Юстировка дифракционной решетки

Для ориентирования положения шкал, сеток и других деталей предусматриваются также необходимые устройства. Например, установка дифракционной решётки показана на рис. 8.10. Решётка 1 закреплена в оправе 2 лапками 3. Конструкция предусматривает поворот решётки вокруг оси ОО для установки штрихов решётки параллельно щели прибора.

Юстировочное приспособление зеркала, конструкция которого показана на рис. 8.11, собрано на трёх расположенных буквой «Г» шаровых опорах – двух шариках 1 и пальце 2, позволяющих проводить юстировку узла с оптикой в трёх взаимно перпендикулярных плоскостях при помощи винтов 3, установленных на основании 4. Силовое замыкание основания 4 со станиной 5 через шаровые опоры в процессе юстировки осуществляется пружиной 6. Результат юстировки фиксируется винтами 7 и 8 со сферическими шайбами 9 и 10, а юстировочные винты 3 предохраняются от отвинчивания стягиванием хомутов винтами 11. Такая конструкция применяется в стационарных приборах, удобна в эксплуатации и надёжна в работе при отсутствии резких колебаний температуры окружающей среды.

Пример простого конструктивного решения узла крепления и юстировки асферического зеркала показан на рис. 8.12. Зеркало 1 установлено на герметик на оси 2. Ось с зеркалом своей сферической частью закреплена на кронштейне 3 при помощи пружины 4, удерживаемой на оси винтом 5, и четырёх винтов 6, позволяющих проводить юстировку зеркала в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Паз на фланце оси предохраняет зеркало от разворота.

Конструкция малочувствительна к вибрации и колебаниям температуры благодаря упругим свойствам пружины и слою герметика.

В большинстве устройств, предназначенных для проведения работ по стационарной интерференции и фотосмещению (оптическому гетеродинированию) возникает необходимость в точных пространственных совмещениях двух когерентных пучков. Угол пространственного совмещения взаимодействующих пучков должен быть значительно меньше 10^{-4} рад.

Кроме того, при работе в ИК-диапазоне, где визуальная юстировка оптического канала затруднена или совсем невозможна, от юстировочных механизмов требуются высокая повторяемость закона перемещения и сохранность исходных установок при изменении температуры окружающего воздуха. Важными во всех случаях являются также отсутствие «перекосов» и взаимная независимость перемещения по двум координатам.

В механизме, показанном на рис. 8.13, сочетаются высокая точность юстировок, достаточный угловой диапазон и хорошая повторяемость закона перемещения.

Грубый поворот юстируемого зеркала 1 осуществляется винтами 2, 3 вокруг вертикальной и горизонтальной осей. Точная юстировка достигается винтами 4, 5, перемещением металлических клиньев 6, 7,

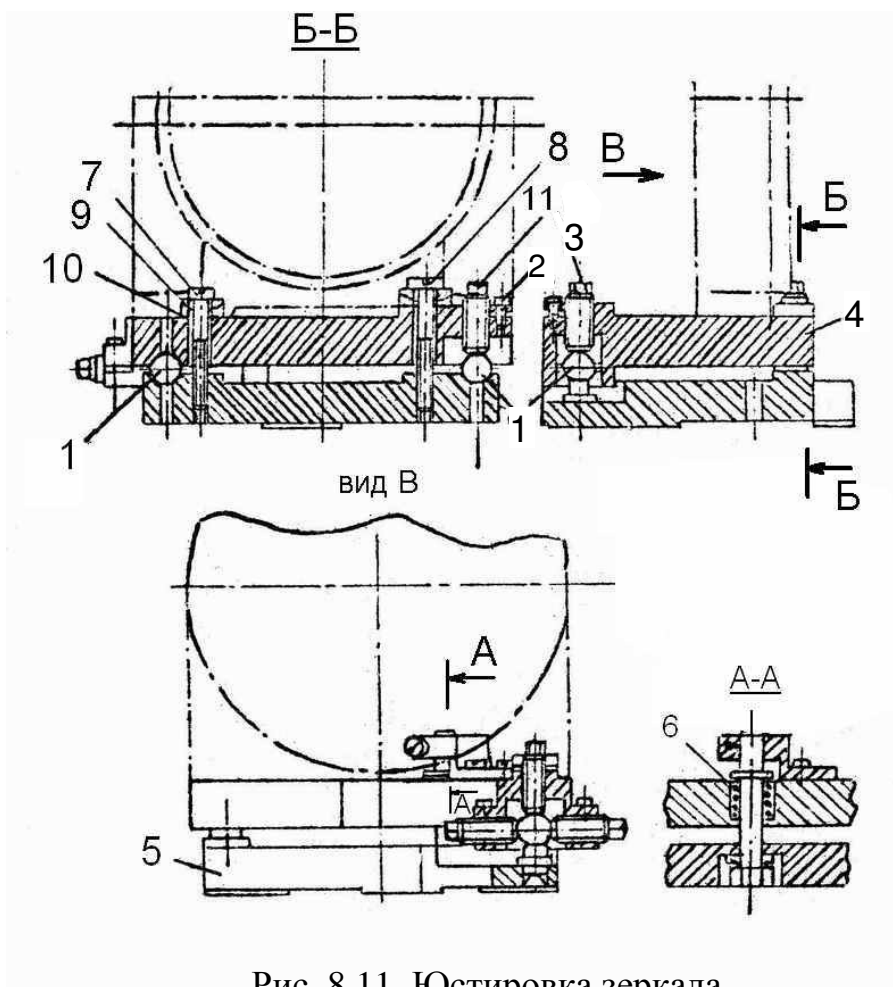


Рис. 8.11. Юстировка зеркала

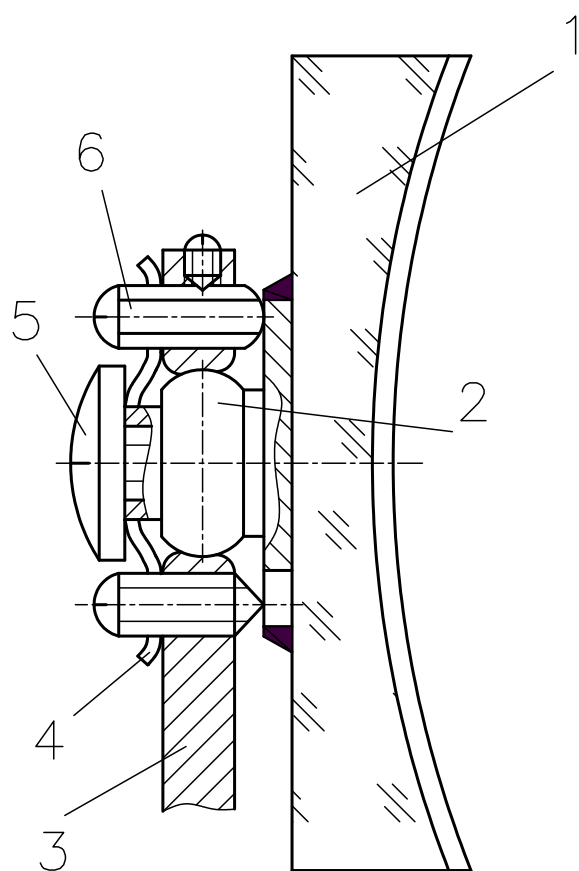


Рис. 8.12. Юстировка асферического зеркала

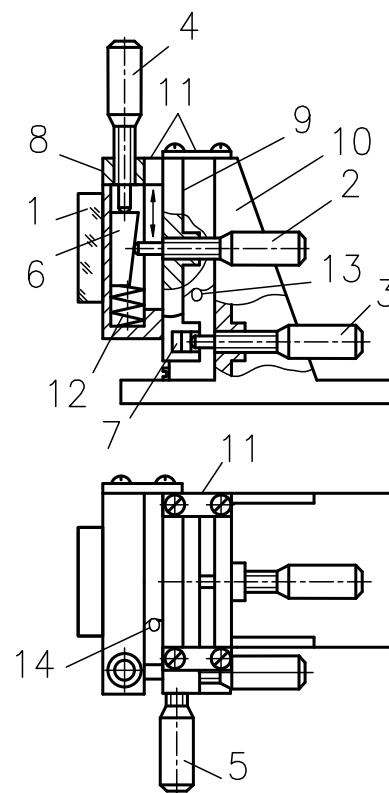


Рис. 8.13. Юстировочный механизм

заложенных в пазах рабочей площадки 8 и платформы 9. Клинья выполнены из легированной стали 40Х и имеют высокую точность обработки поверхностей. Угол при вершине клина составляет $2^{\circ}30'$; рабочая поверхность – 45мм. Поворот площадки 8 и платформы 9 относительно неподвижного основания 10 осуществляется за счёт изгиба плоских пружин 11. Ширина и толщина пружин выбрана с учётом обеспечения поперечной жёсткости конструкции механизма. Винтовые цилиндрические пружины 12 (вторая пружина на рисунке не показана) закреплены в пазах рабочей площадки 8 и платформы 9 и обеспечивают клиньям 6, 7 поступательный обратный ход при вывинчивании винтов 4, 5. Для надёжного замыкания кинематических звеньев 8, 9 и 9, 10 в конструкции использованы цилиндрические пружины 13, 14, работающие на растяжение. С целью исключения перекосов рабочей площадки 8 при значительных отклонениях, её пружины закреплены строго симметрично относительно шарниров 11, как и винты грубой наводки 2, 3.

При изменении температуры от -25 до $+70^{\circ}\text{C}$ механизм показал высокую степень сохранности начальных установок. Разъюстировка в этом интервале температур составляет 0,032%. Повторяемость закона перемещения в любом диапазоне углов – в среднем 0,998 при подходе микрометрического винта слева и 0,999 – справа. Такая несимметричность объясняется, по-видимому, наличием трения в микрометрической паре, работающей под нагрузкой, и неупругой деформацией её резьбы.

Обладая линейностью угловой характеристики в диапазоне отклонений $0 - 4^{\circ}$ (угловая чувствительность в этом интервале остаётся почти постоянной и равной $17,2''$), а также точной юстировкой с ценой деления $0,733''$ и высокой повторяемостью закона перемещения с незначительным взаимовлиянием координатных осей, рассмотренный юстировочный механизм показал, помимо простоты эксплуатации, высокую надёжность при работе в гомодинных и гетеродинных оптических системах ИК-диапазона как при юстировке фотосместителя, так и при наведении излучения на удалённый объект.

Ранее в основном были описаны механизмы, имеющие регулируемую установку оптических СЧ. При необходимости обеспечения надёжности юстировки используют и постоянную установку деталей, хотя в этом случае процесс юстировки более трудоёмок.

Схема юстировки входной призмы 3, установленной перпендикулярно к оси ОО объектива, устанавливаемого в отверстие кронштейна 5, показана на рис. 8.14а. При юстировке применяют автоколлимационную трубку 1, плоскопараллельную аллюминированную пластинку 2 и дополнительную втулку 6. Сначала устанавливают втулку 6, пластинку 2 и с наружной стороны с помощью автоколлимационной трубки снимают начальные отсчёты в двух направлениях. Затем устанавливают призму 3 в оправу 4 и к выходной грани прикладывают пластину 2, снятую со втулки 6. Сравнивают полученные отсчёты с

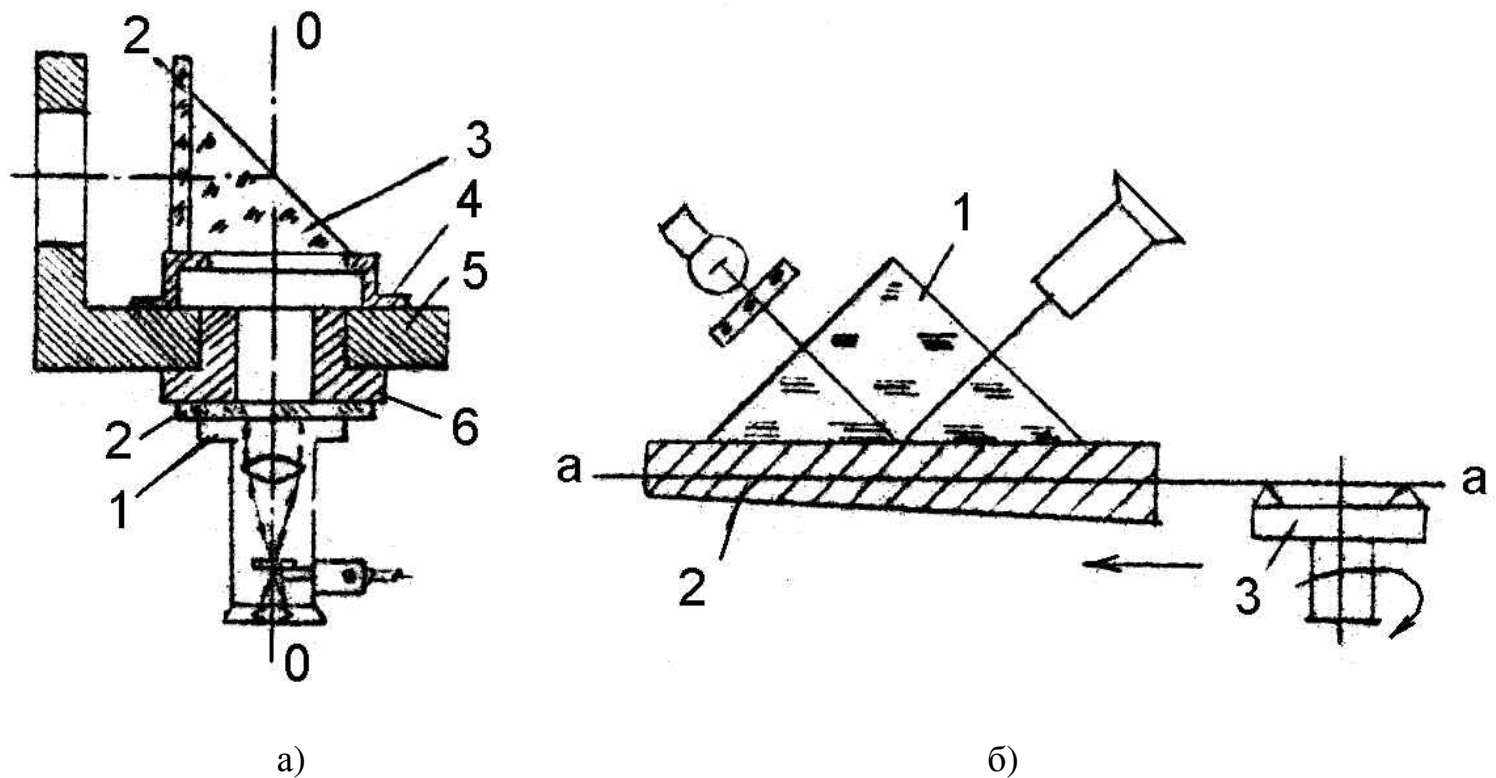


Рис. 8.14. Постоянные установки деталей

начальными и при необходимости шабруют опорные плоскости оправы 4 до тех пор, пока разность отсчётов будет соответствовать допускаемым отклонениям.

Рис. 8.14б иллюстрирует другой вариант постоянной установки призмы на кронштейне. Призму 1 клеят к кронштейну 2. Затем выверяют её грани автоколлимационным способом. Далее обрабатывают опорную поверхность а – а кронштейна фрезой 3. В приборе призму устанавливают на эту поверхность.

Контрольные вопросы.

1. Охарактеризуйте юстировочные механизмы, показанные на рис. 8.5, 8.6, 8.8 по свойствам, указанным в таблице.
2. Разработайте механизм для юстировки прямоугольной призмы, обеспечивающий независимое перемещение и поворот по двум осям.

Глава 9. Диафрагмы и щели

Диафрагмами называются детали и узлы, служащие для ограничения сечения пучка лучей, проходящего через ОП. По использованию в оптической схеме диафрагмы разделяются на апертурные, применяемые для регулирования освещённости, и полевые, которые ограничивают линейное и угловое поля (например, кадровые рамки в фотокиноаппаратах, диафрагмы в окулярах и т.п.). Наиболее высокие требования обычно предъявляются к полевым диафрагмам. По форме светового сечения диафрагмы разделяются на круглые, квадратные, прямоугольные и др. в соответствии с формой сечения. В зависимости от способа изменения размера светового сечения различают диафрагмы постоянные, сменные (меняющие размеры скачками) и ирисовые, которые обеспечивают плавное изменение размеров сечения.

Постоянная диафрагма небольшого диаметра, служащая для выделения в поле зрения того или иного места объекта, называется зондом.

Конструкция сменных зондов, используемых в микроспектрофотометрах для ограничения размера фотометрируемого участка клетки, показана на рис. 9.1. Для этого в отражающих слоях, нанесённых на сменные сферические зеркала 1, сделаны отверстия диаметром от 0,03 до 0,5 мм. С помощью объективов, имеющих увеличение от 2,5 до $100^{\times}$, а иногда и дополнительными системами, клетка проецируется на поверхность зеркал. Наблюдатель видит в поле зрения изображение объекта и диафрагму в виде чёрной точки. При объективе с увеличением $100^{\times}$ и зонде 0,03 мм на объекте выделяется участок размером $0,03/100 = 0,0003$ мм.

Пучок света, прошедший через зонд, далее направляется на ФЭУ. Центрирование зонда осуществляется винтами 2.

Часто используют постоянные диафрагмы, получаемые фотопутём. Для этого на планшете (обычно его размеры не превышают 1,5х1,5 м.) вычерчивается диафрагма в большом масштабе (50:1, 100:1 и более). Затем она в необходимом масштабе фотографируется на стеклянную пластинку. С полученного оригинала диафрагма методом контактной печати наносится на оптическую деталь.

Такая диафрагма (рис. 9.2) использована в фотоэлектрической насадке ФЭН-1 для автоматического наведения на границу света и тени.

Объектив 1 строит теневое изображение предмета в плоскости изображения, в которой находится диафрагма, нанесённая на защитном стекле 2. Защитное стекло приклеено к кубику 3, на гипотенузной грани которого имеется в центре зеркальное покрытие 4. Диафрагма выполнена в виде круга и кольца. Свет, проходящий через круг, отражается от зеркального покрытия 4 и направляется на линзу 5, а свет, проходящий через кольцо, проходит сквозь кубик и направляется на линзу 6. Линзы 5 и 6 проецируют входной зрачок на фотоприёмники (на рисунке уже

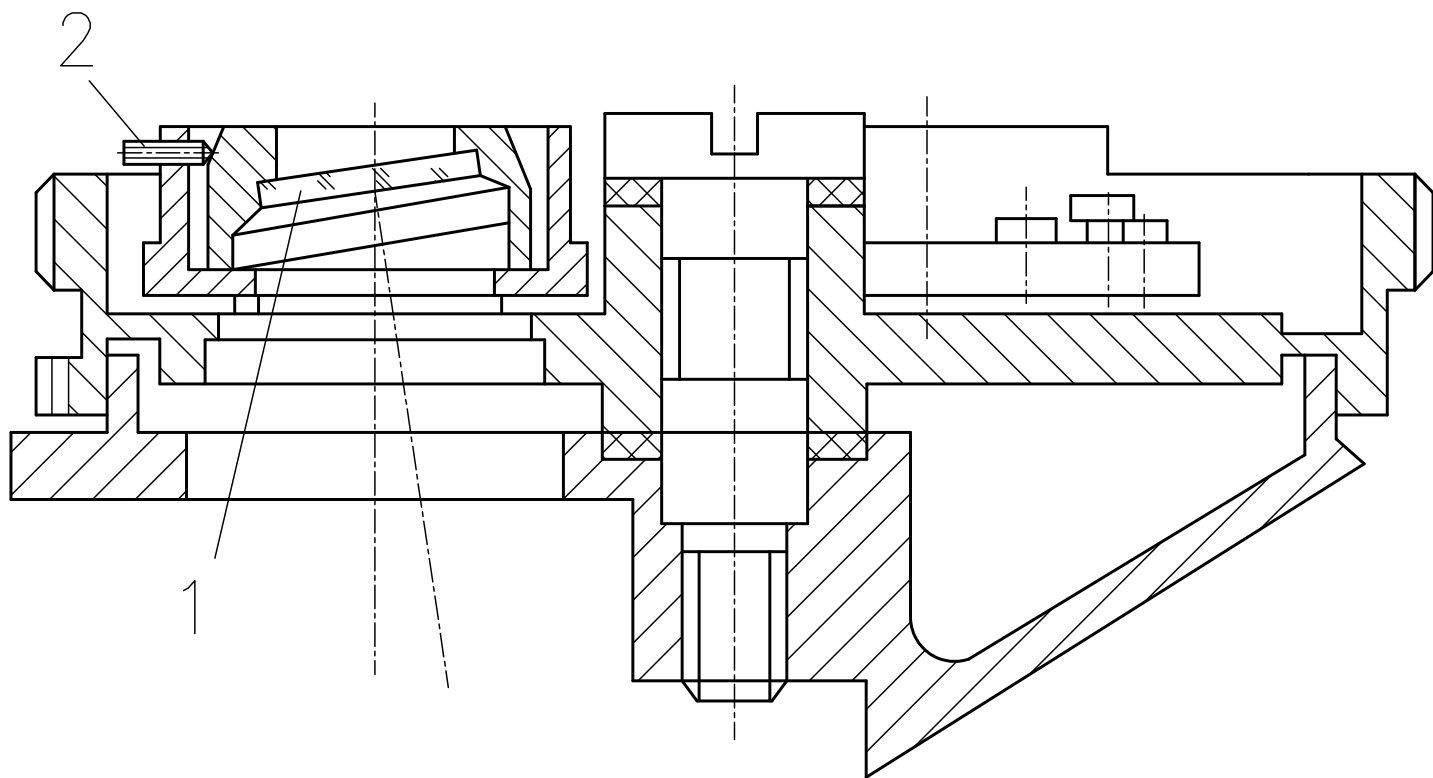


Рис. 9.1. Сменные зонды

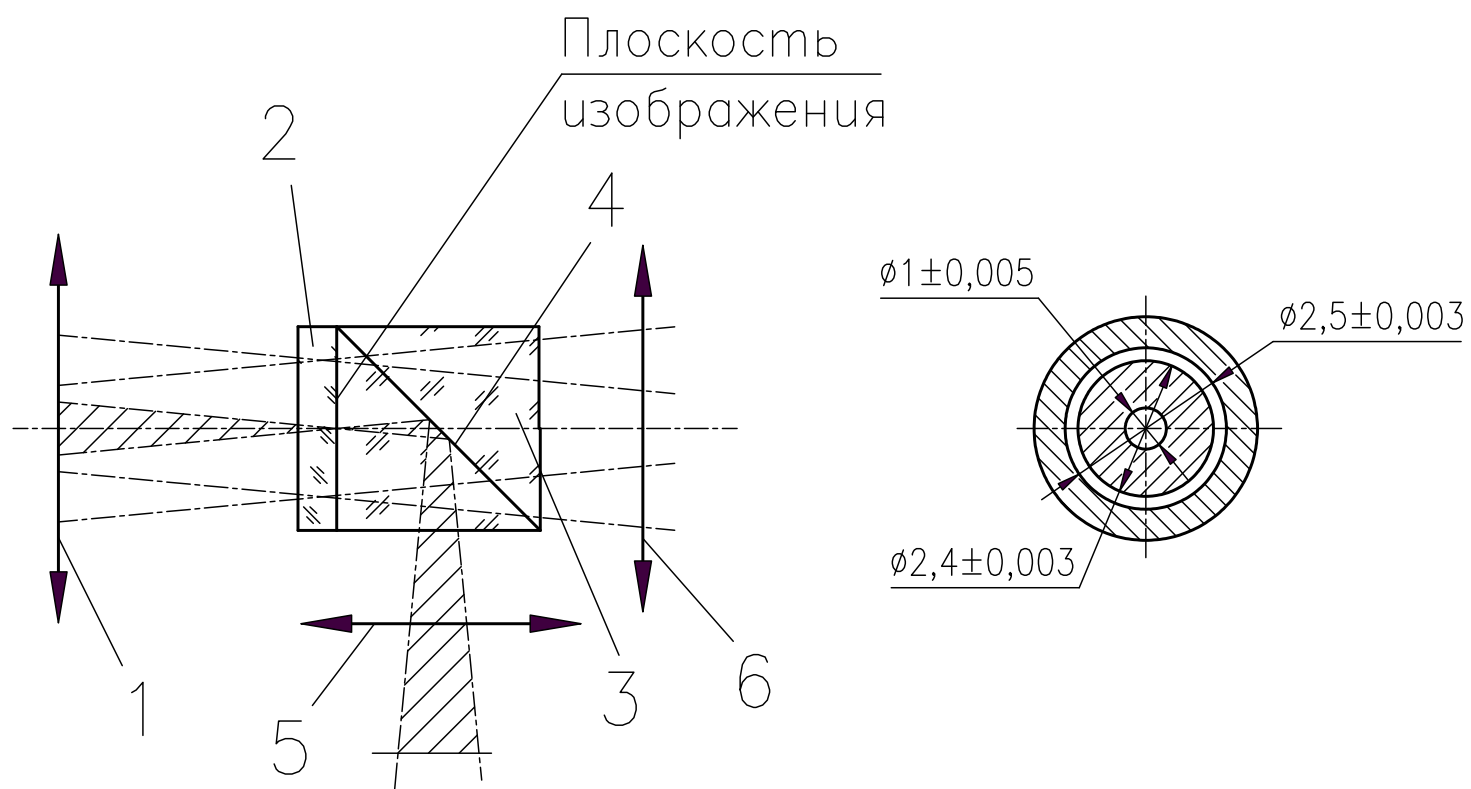


Рис. 9.2. Диафрагма для автоматического наведения

не показаны). Так как площади кольца и круга равны, то в момент прохождения прямолинейной границы света и тени через центр диафрагмы световые потоки, падающие на фотоприёмники, включённые по дифференциальной схеме, выравниваются, и выдаётся сигнал наведения на границу.

Конструкция сменных кольцевых диафрагм, используемых в конденсорах, приведена на рис. 9.3. Кольцевые диафрагмы 1 установлены в поворотном диске 2. Центрирование колец диафрагм с оптической осью конденсора производится винтами 3, перемещающими втулку 4. На втулке 4 установлена ось 5 с диском 2.

Ирисовые диафрагмы позволяют плавно изменять световое сечение оптического пучка. Минимальный размер светового сечения ирисовой диафрагмы составляет 0,5...1 мм. Световое отверстие диафрагмы обычно имеет круглую форму. Однако встречаются ирисовые диафрагмы, имеющие и другие формы (многоугольника, квадрата и т.п.). Конструкция и расчёт круглых ирисовых диафрагм подробно описаны в соответствующей литературе. Поэтому рассмотрим ирисовые диафрагмы с прямолинейным краем лепестка, используемые в фотоаппаратах. При расчёте этих диафрагм определяется зависимость площади S светового отверстия от угла поворота установочного кольца φ : $S = F1(\varphi)$. Эта зависимость является функцией угла поворота лепестка диафрагмы φ_l , т.е. $S = F2(\varphi_l)$.

При разработке диафрагмы (рис. 9.4) предварительно задают число лепестков, максимальный диаметр отверстия, габариты конструкции и другие геометрические размеры. При повороте установочного кольца 1 происходит поворот лепестка 2 относительно основания 3. Рассчитаем параметры движения звеньев механизма и их точность.

Зададим функцию, связывающую площадь светового кольца с углом поворота φ по формуле

$$S = \frac{\pi d^2}{4} \times 2^{-\varphi/\varphi_0}, \quad (9.1)$$

где d – диаметр светового отверстия,
 φ_0 – угловой шаг шкалы диафрагмы.

Такой закон построения равномерной шкалы позволяет уменьшить площадь отверстия вдвое при повороте кольца 1 на угловой шаг φ_0 , т.е. при переходе от одного относительного отверстия к следующему отверстию кольцо поворачивается на одинаковый угол.

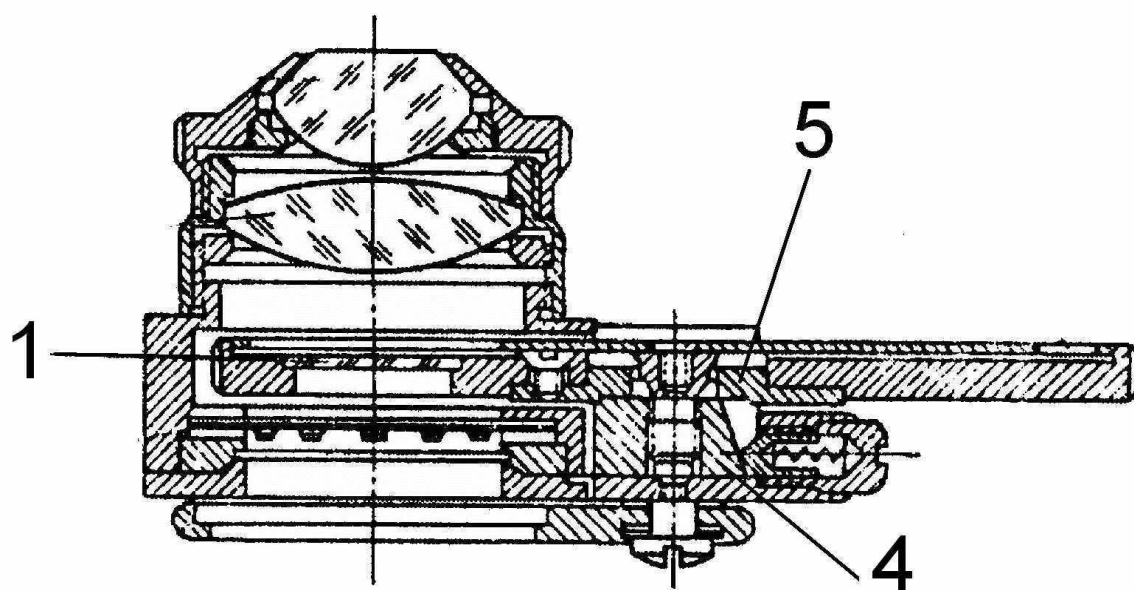
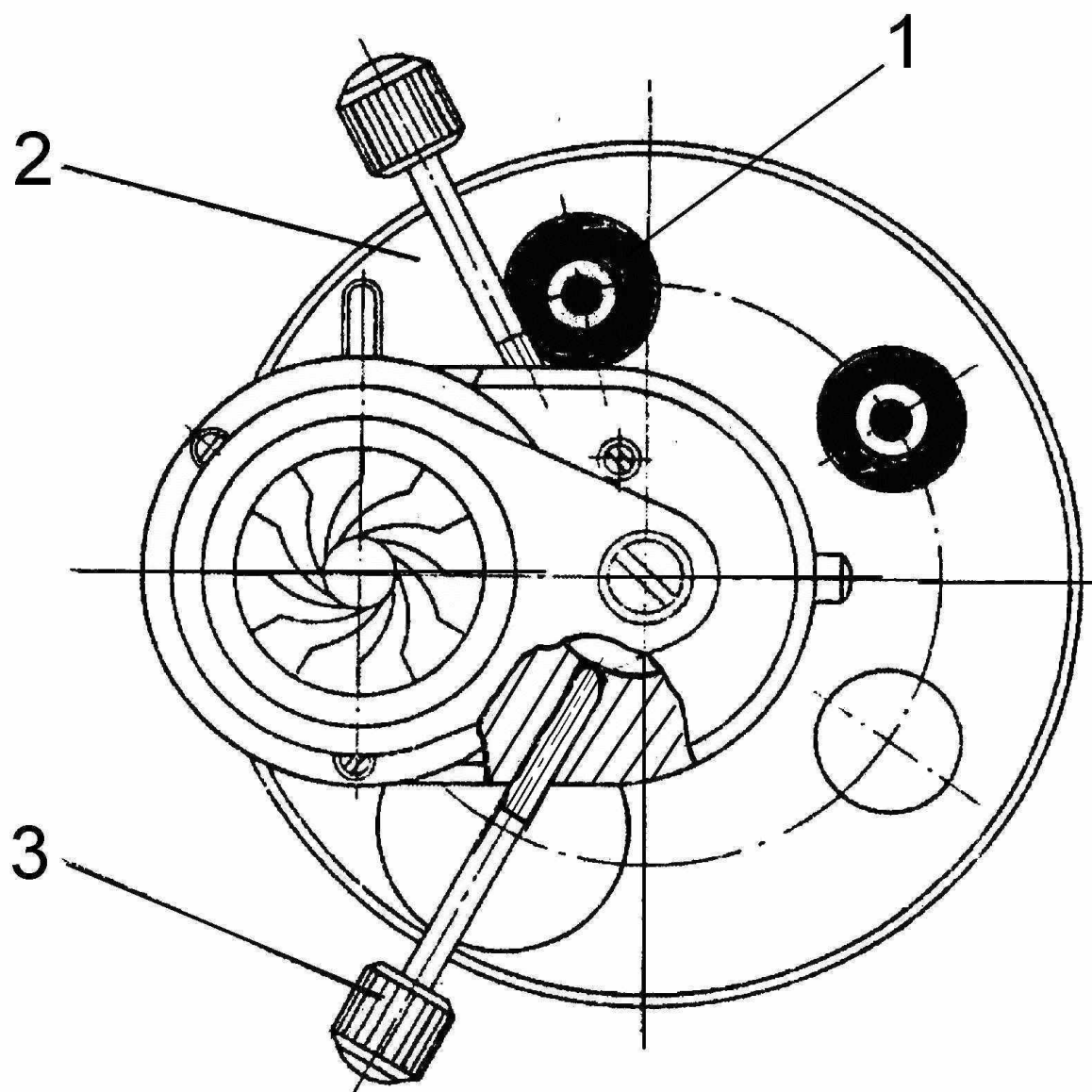


Рис. 9.3. Кольцевые сменные диафрагмы конденсора

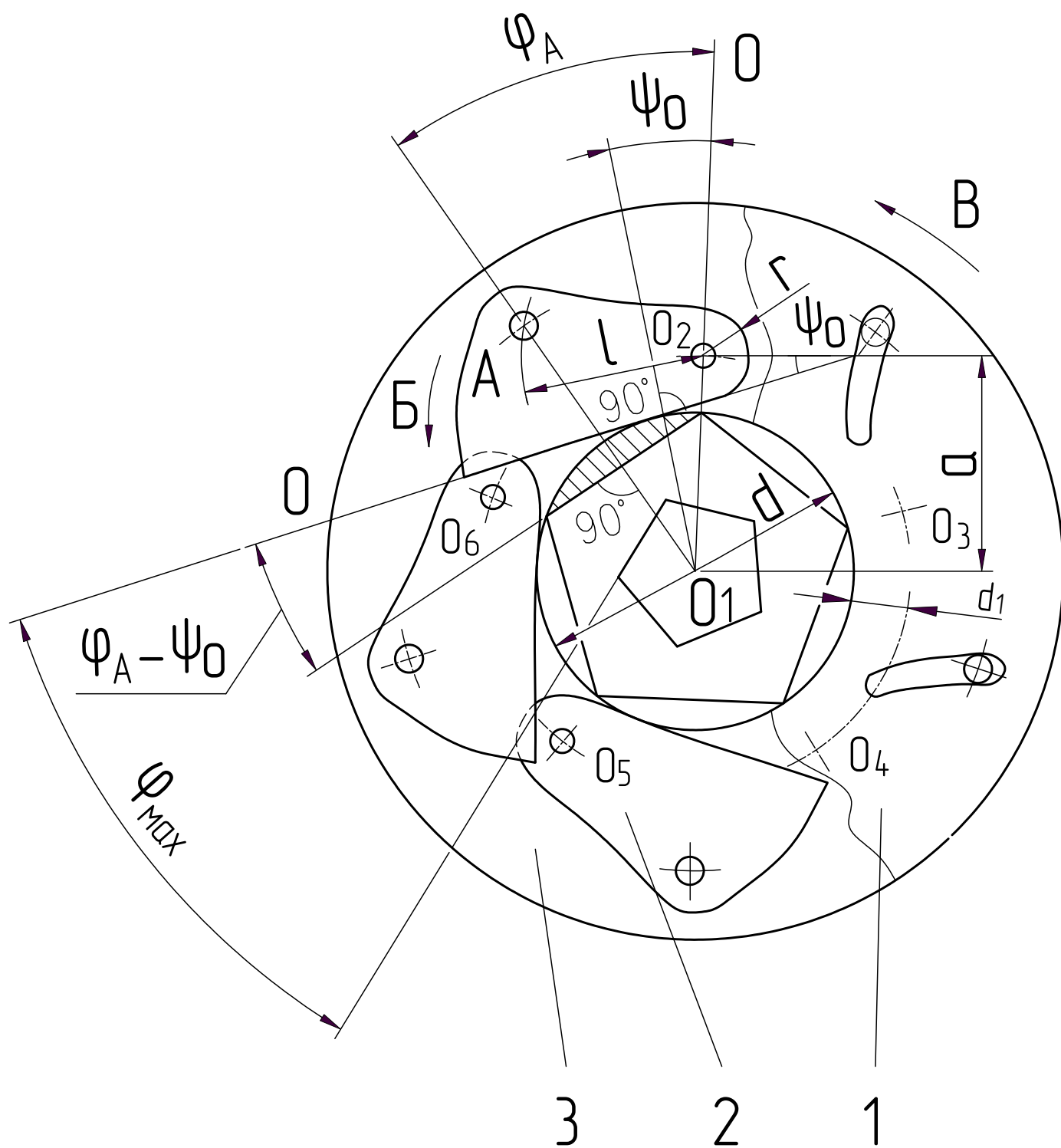


Рис. 9.4. Ирисовая диафрагма в форме многоугольника

Площадь светового отверстия

$$F = \frac{\pi d^2}{4} - n \times F_{\text{сегм}} = n(a \times \cos \varphi_{\text{л}} - r) \times \frac{2(a \times \cos \varphi_{\text{л}} - r)}{2} \times \text{tg} \frac{\pi}{n},$$

где n – число лепестков,

$F_{\text{сегм}}$ – площадь заштрихованного сегмента.

Или, окончательно,

$$F = n(a \times \cos \varphi_{\text{л}} - r)^2 \times \text{tg} \frac{\pi}{n}, \quad (9.2)$$

где a и r – параметры диафрагмы.

Погрешность площади светового отверстия будет равна

$$\Delta F = \frac{\partial F}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial F}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial F}{\partial r} \Delta r + \frac{\partial F}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial F}{\partial \varphi_{\text{л}}} \Delta \varphi_{\text{л}}. \quad (9.3)$$

В отдельных случаях конструкция диафрагмы должна обеспечивать возможность точного совмещения с оптической осью или, наоборот, смещение оси диафрагмы относительно оптической оси на большее расстояние. Отдельные диафрагмы имеют и фокусирующее перемещение вдоль оптической оси.

Конструкция апертурной диафрагмы показана на рис. 9.5. Диаметр диафрагмы 1 можно изменять вращением кольца 2. Для получения косо освещенной диафрагму смещают относительно оптической оси прибора на направляющей 3 с помощью винта 4. Смещенная диафрагма в отдельных приборах поворачивается на 360° , что позволяет осуществлять косо освещение любой стороны объекта.

Рассмотрим конструкции отдельных деталей диафрагм, используемые в современных приборах. На рис. 9.6(а) показана штампованная конструкция лепестка диафрагмы с двумя отогнутыми концами, выполняющими функции цапф в классических конструкциях. Штампованная коронка (рис. 9.6б) позволяет уменьшить размер диафрагмы вдоль оси. В последних конструкциях также широко применяются пластмассовые детали.

Для управления изменением диаметра ирисовых диафрагм используют зубчатые, реечные, рычажные и другие механизмы. В центрировочных механизмах взамен винтовых пружин начали применять

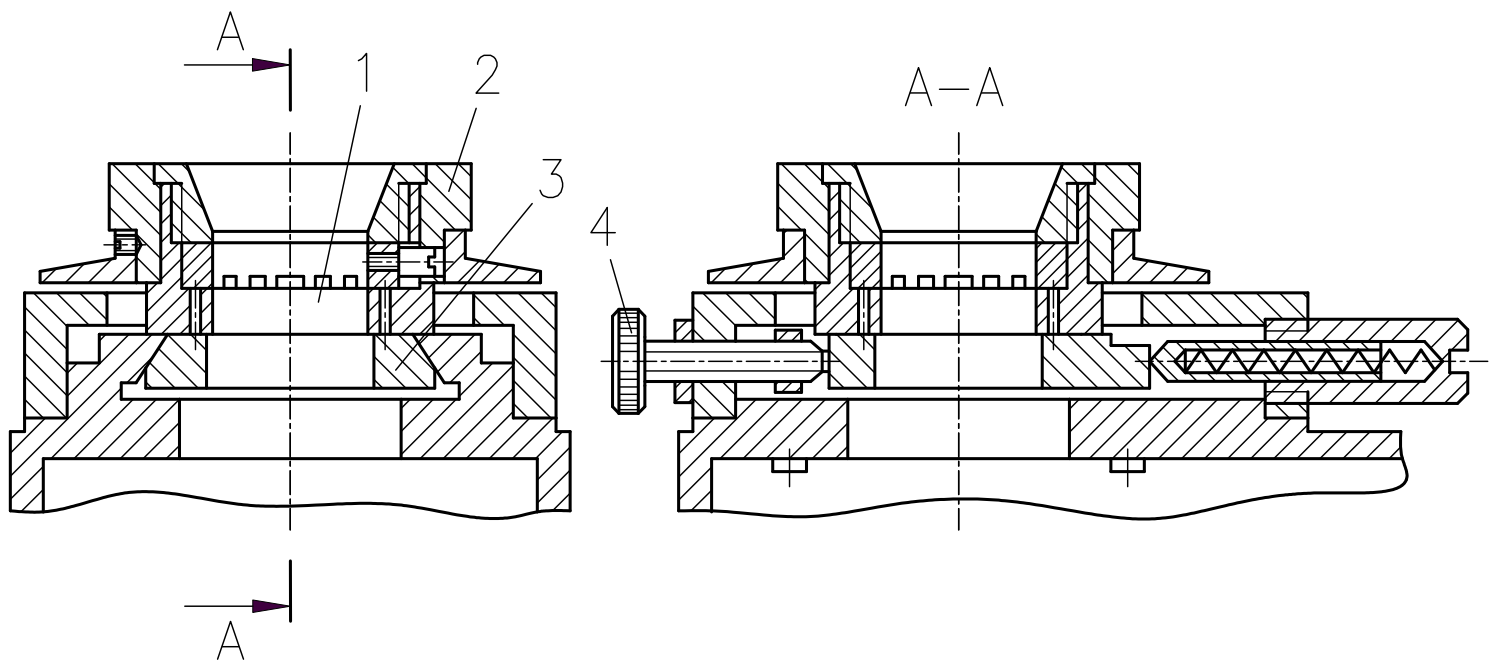
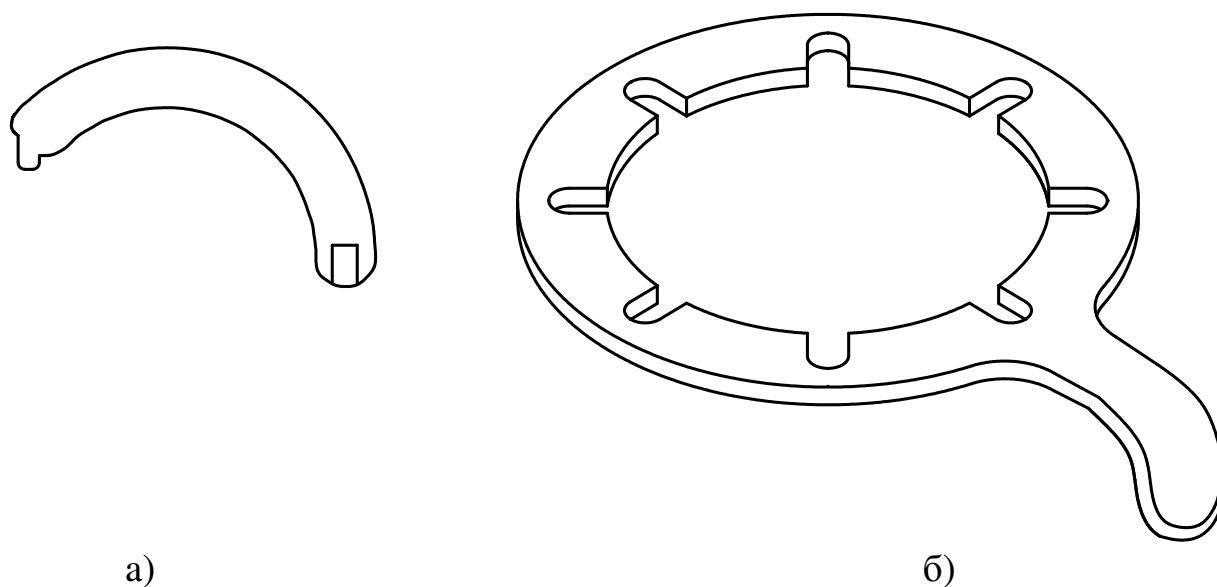


Рис. 9.5. Диафрагма, смещаемая с оси



а)

б)

Рис. 9.6. Конструкция деталей ирисовых диафрагм

плоские пружины.

Разновидностью диафрагм являются щели, которые имеют длину светового сечения, значительно превышающую его ширину. Они широко применяются в монохроматорах, спектральных приборах, скоростных кинокамерах и других ОП, где необходимо вырезать в световом пучке узкую часть.

В спектральных приборах на конструкцию щели обращают большое внимание, так как изменением ширины щели меняют величину светового потока и разрешающую способность прибора. Механизм раскрытия щели должен обеспечивать плавное симметричное движение ножей щели.

Управление шириной щели проводится различными способами –
– механическими, электромагнитными и др.

В электромагнитных механизмах щелей управление осуществляется с помощью функциональных потенциометров.

Глава 10. Узлы источников излучения

В лабораторных и других ОП используют различные источники излучения для создания светового потока при выполнении основной функции, например, линейных и угловых измерений, микроскопировании, проекции и т.д. Они также применяются как эталонные источники и при выполнении вспомогательных операций для подсветки шкал, сигнализации и т.д. К наиболее распространенным источникам излучения относятся лампы накаливания, газоразрядные лампы, в том числе и люминесцентные лампы, лазеры и светодиоды.

Обычные и галогенные лампы накаливания применяют в тех случаях, когда требуется получение сплошного спектра излучения в диапазоне 0,4...2,5 мкм. К качеству стекла баллонов, размеру и расположению тела накала, напряжению питания и конструкции цоколя этих ламп предъявляются повышенные требования в отношении точности размеров, обеспечения стабильности положения и т.п.

В последнее время большое распространение получают галогенные лампы, которые используют восстановление испарившегося вольфрама нити благодаря присутствующему в кварцевой колбе галогену (йоду, бром и др.). По сравнению с обычными лампами накаливания галогенные лампы имеют увеличенную яркость, лучшую стабильность светового потока, отсутствие потемнения колбы, меньшие габариты, увеличенный срок службы и другие преимущества.

К газоразрядным лампам относятся ксеноновые, ртутные, импульсные, люминесцентные и другие лампы высокого и сверхвысокого давления. Зажигание этих ламп производят пусковыми приспособлениями, что повышает стоимость эксплуатации ламп.

Лазеры находят широкое применение в таких ОП, где требуется высокая монохроматичность, когерентность и малая расходимость луча. В ОП применяют газовые, полупроводниковые и твердотельные лазеры, работающие в импульсном и непрерывном режимах.

Светодиоды характеризуются высокой световой отдачей, малым энергопотреблением, большим сроком службы и другими ценными свойствами. Предполагается, что к 2010 г светодиоды в значительной степени заменят лампы накаливания.

Конструктору ОП часто приходится учитывать нагрев узлов для установки источников излучения. Излишний нагрев уменьшает срок службы ламп и их цоколей, затрудняет работу центрировочных механизмов и т.п. Температура тех узлов, к которым может прикоснуться человек, не должна превышать 45°.

Как известно, теплоотвод осуществляется с помощью теплопроводности, конвекции и теплового излучения.

Мощность теплопередачи для каждого из этих процессов определяется следующими формулами:

$$N_T = S \Delta \vartheta \lambda / l, \quad (10.1)$$

$$N_K = S \Delta \vartheta \alpha_K, \quad (10.2)$$

$$N_I = S \Delta \vartheta \alpha_s. \quad (10.3)$$

Здесь N_T , N_K , N_I – количество тепла, ккал/ч, отводимое в единицу времени за счёт теплопроводности, конвекции и теплового излучения соответственно;

S – площадь, м²;

$\Delta \vartheta$ – разница температур;

l – толщина стенки;

λ – коэффициент теплопроводности, ккал/ч×м×°С, его значение находится в пределах от 10 до 400 для металлов, а для воздуха и пластмасс – менее 0,004;

α_K – коэффициент теплоотдачи конвекцией, при свободном потоке воздуха $\alpha_K = 5 - 10$;

α_s – коэффициент излучения, ккал/ч×м×°С, зависящий от абсолютной температуры тел, плотности излучения чёрного тела и степени чёрного тела.

При разработке узлов для установки источников излучения приходится решать обычно две задачи:

- обеспечить минимальную температуру деталей узлов, т.е. максимальный отвод тепла;
- обеспечить минимальную передачу тепла на прибор, т.е. максимальную изоляцию источника тепла от прибора.

Из формул можно сделать качественные выводы, которыми должен руководствоваться разработчик:

- для увеличения отвода тепла следует увеличить площадь поверхности узлов для установки источников излучения;
- из формулы (10.1) следует, что для уменьшения теплопередачи от узлов с источниками излучения к прибору следует установить теплоизоляционные прокладки и уменьшить площади деталей, осуществляющих связи между ними;
- значительное уменьшение передачи тепла за счёт теплового излучения даёт применение теплофильтров и экранов.

Включение теплофильтров в световой пучок позволяет снизить температуру оптических деталей на десятки градусов. Установка экранов между источником излучения и другими деталями осветителя также позволяет значительно уменьшить нагрев кожуха. Иногда устанавливают даже два – три экрана.

Температура линз коллектора и его оправ может достигать 100°С и более. Поэтому необходимо предусматривать меры, гарантирующие работоспособность коллекторов при нагревании. Для изготовления линз,

особенно расположенных близко к источнику излучения, используют стёкла с уменьшенными коэффициентами линейного расширения. Линзы и движущиеся оправы устанавливают с гарантированными радиальными и осевыми зазорами в 0,12 – 0,25 мм.

При установке источника излучения в приборе обычно выполняют две юстировочные операции – совмещение нити накала источника излучения с оптической осью и фокусирование нити в необходимую плоскость (апертурную диафрагму, на щель, в плоскость предмета и т.п.). Отметим, что в отдельных случаях (например, создание косого освещения, повышение рельефа изображения объекта и т.п.) смещают нить источника света, а иногда и вращают её в смещённых положениях вокруг оптической оси.

На рис. 10.1а показано расположение нити лампы 1 и коллектора 2 на оптической оси. Стрелка 3 показывает фокусирующее движение, которое может быть выполнено перемещением источника излучения 1, коллектора 2 или их общим перемещением по стрелке 4. Фокусирующее перемещение обычно осуществляется с помощью поступательного движения вдоль оси.

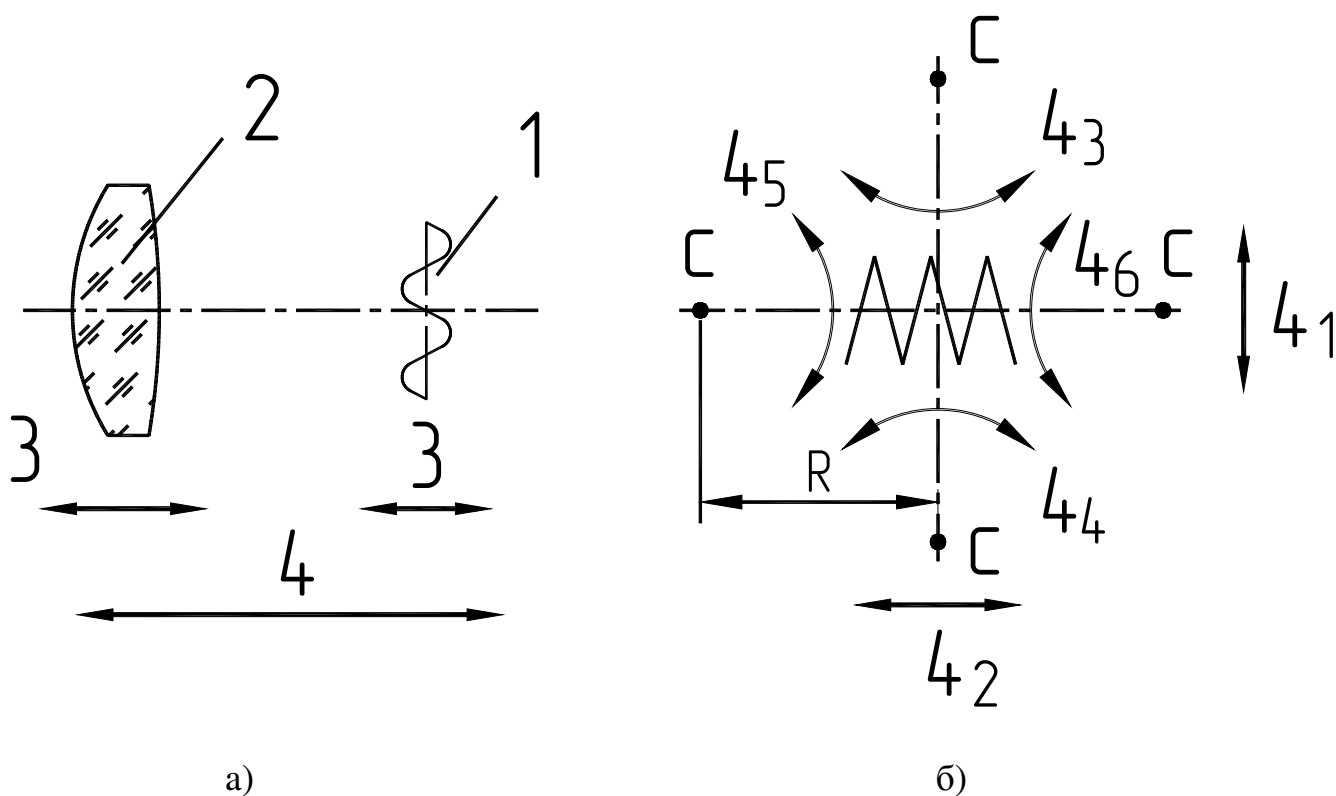


Рис. 10.1. Фокусирование и центрирование нити лампы

Для центрирования нити используют поступательное, вращательное или оба движения (см.рис. 10.1б) в плоскости, перпендикулярной к оптической оси. Стрелки 4_1 и 4_2 показывают поступательное движение, а

стрелки $4_3, 4_4, 4_5, 4_6$ — вращательное движение вокруг центров C по радиусу R .

Рассмотрим несколько конструкций узлов для установки источников излучения.

На рис. 10.2 представлена конструкция фонаря галогенной лампы 20 Вт, 6 В. Нить лампы 1 совмещают с оптической осью при вращении патрона лампы 2 вокруг оси AA и поступательном перемещении вдоль оси BB .

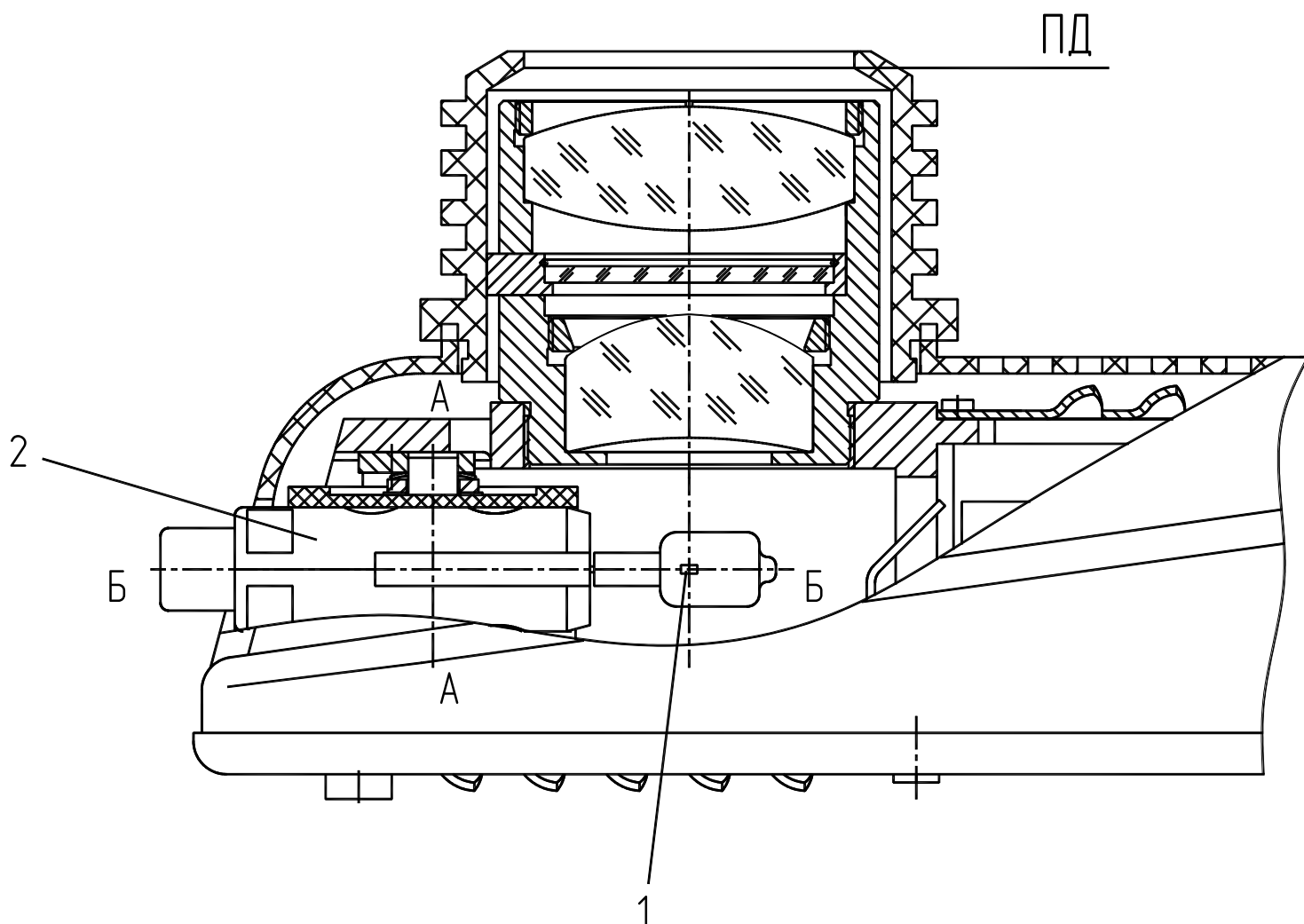
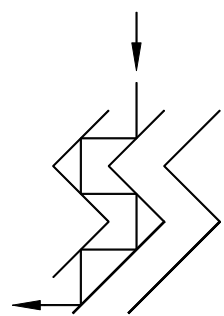
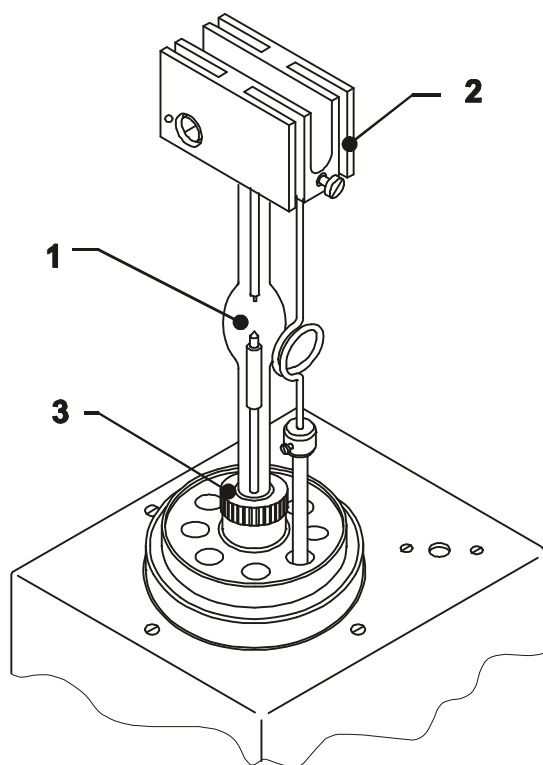
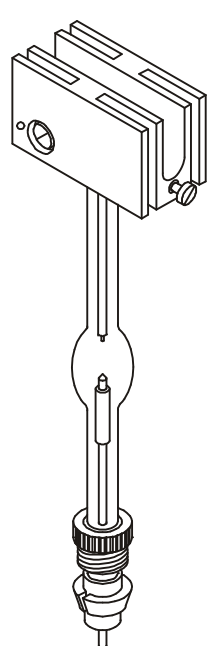
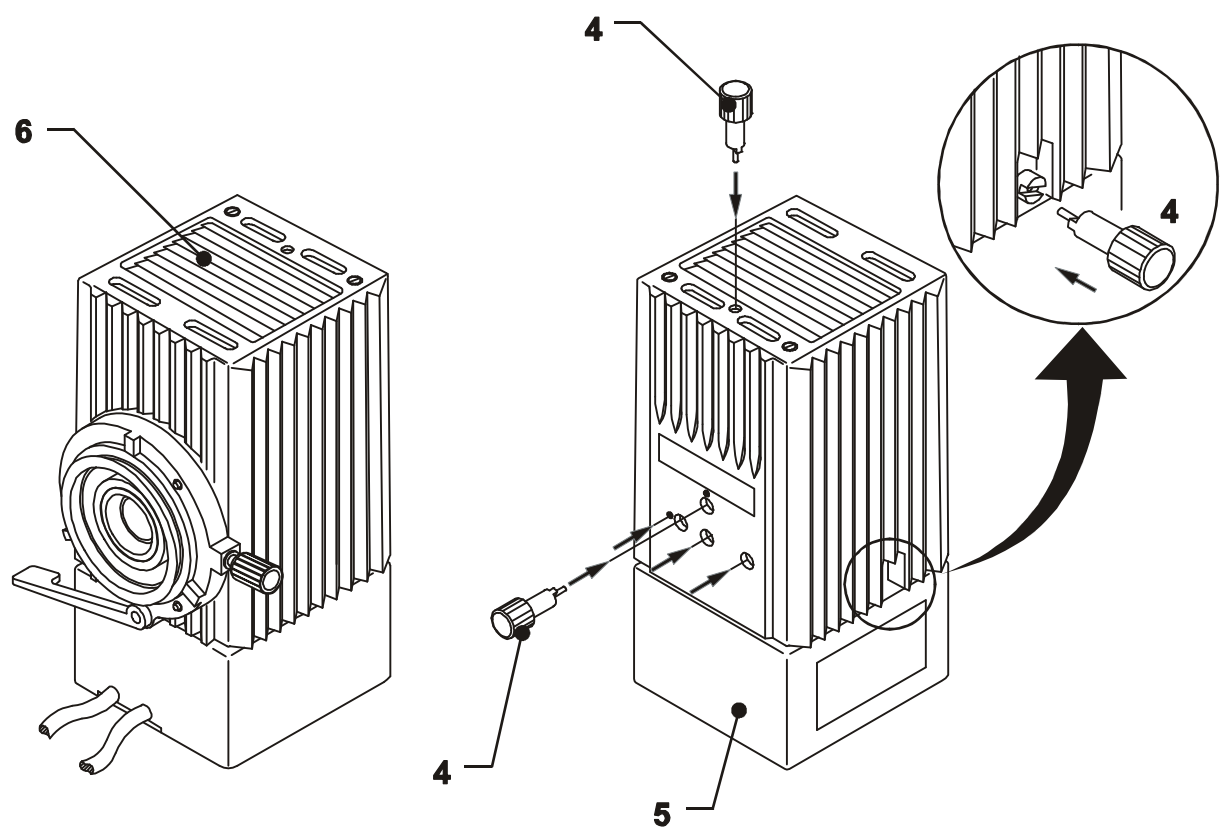


Рис. 10.2. Фонарь галогенной лампы 6 В, 20 Вт

На рис. 10.3а показан фонарь и установка газоразрядной лампы 1 в фонаре. Питание к лампе подаётся через зажимы 2 и 3. Центрирование лампы производится перемещением с помощью винтов 4. Снизу фонаря закреплено пусковое устройство 5.

Для улучшения конвекции и светозащиты фонаря взамен защитных козырьков 6, имеющих один изгиб, используют козырьки с двойным изгибом, показанные на рис. 10.3б, которые обеспечивают почти полное



a)

b)

Рис. 10.3. Фонарь газоразрядной лампы

поглощение света при наблюдении фонаря.

После изготовления узлов для установки источников излучения необходимо провести определение температурных полей и при необходимости внести изменения в конструкцию. Такой эмпирический путь вызван тем обстоятельством, что детальный теоретический анализ температурных полей осветителей достаточно сложен.

Отдельные точки на деталях осветительной системы, в которых с помощью термопары измерялась температура, показаны на рис. 10.4.

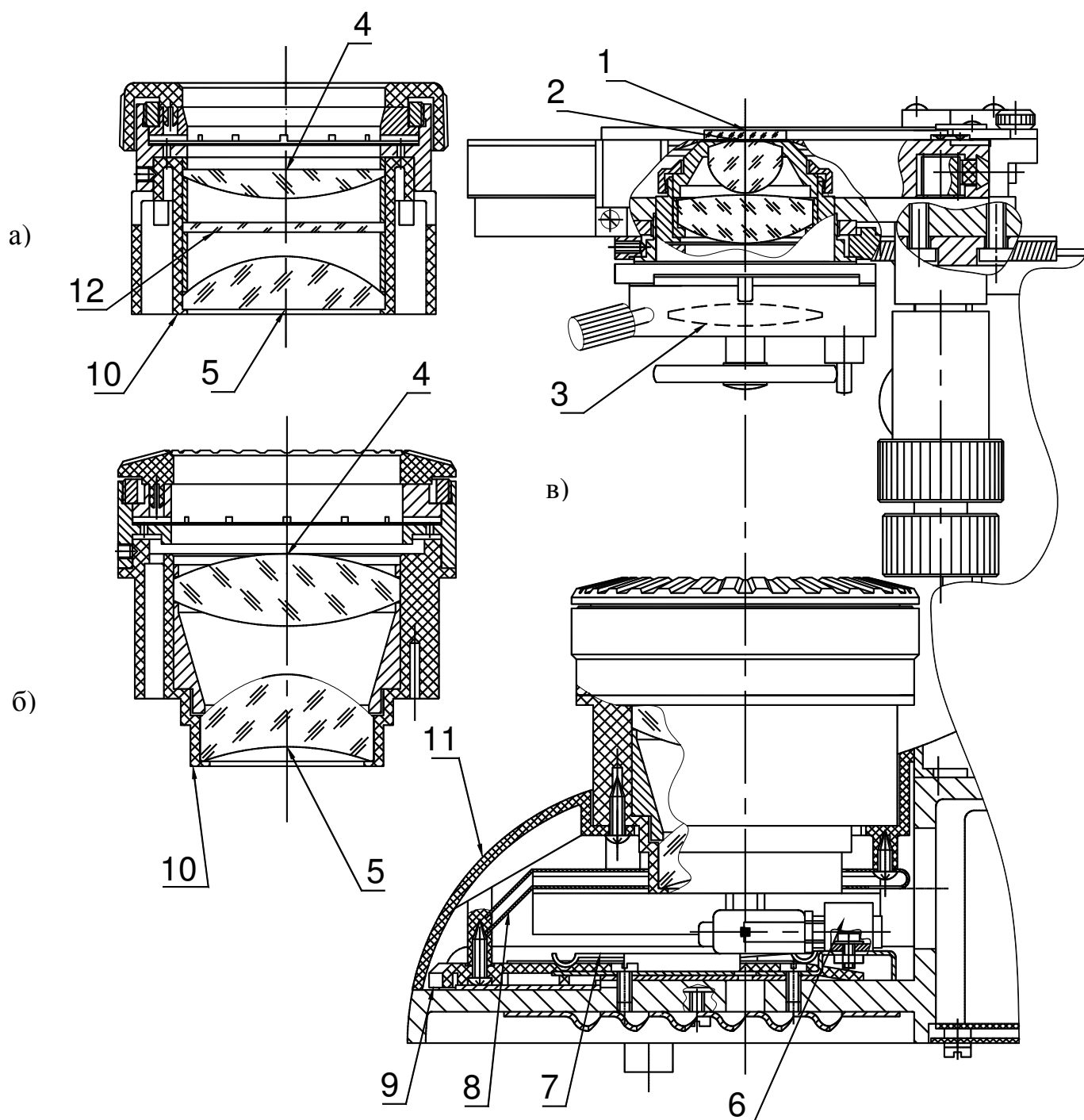


Рис. 10.4. Измерение температуры на деталях осветителя

Для осветителя были изготовлены две системы коллекторов (рис. 10.4а, 10.4б). В одной системе установлено матовое стекло 12, в другой – матирована нижняя поверхность линзы 5. Матирование было выполнено на трёх деталях, имеющих шероховатость поверхностей 2,5; 1,6; 0,63. Был предусмотрен и вариант без покрытия. В осветителе (рис. 10.4в) установлена галогенная лампа 3 мощностью 20 Вт и два экрана 8 для уменьшения нагрева за счёт излучения.

График температуры точек, обозначенных на деталях цифрами 1, 2, 3...11 показан на рис. 10.5. Из результатов эксперимента следует, что

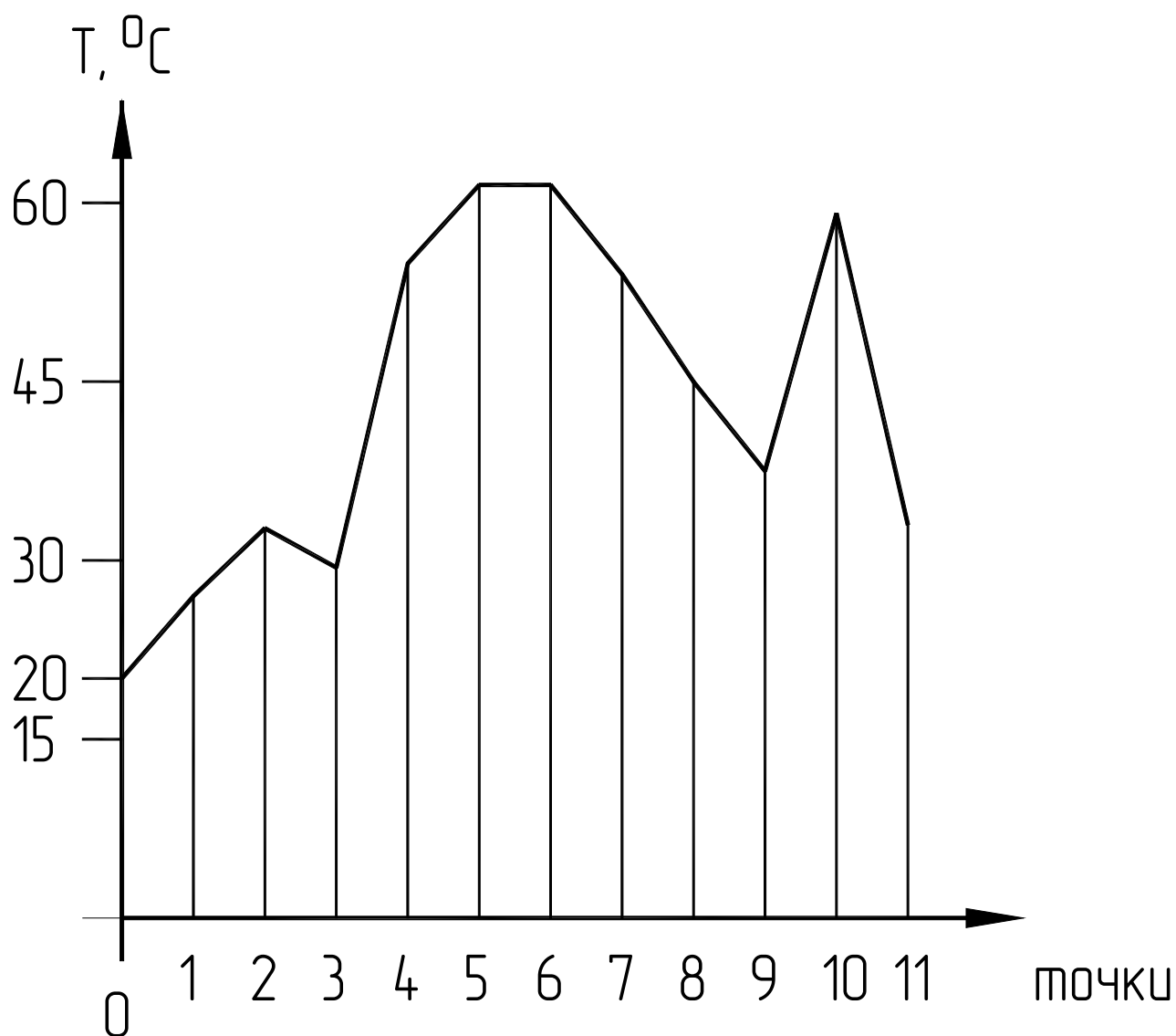


Рис. 10.5. Температурное поле осветителя

температура наружной поверхности 11, (см. рис. 10.4в) к которой может прикасаться оператор, не превышает 37°C. Температура деталей, соприкасающихся с пластмассовыми поверхностями (точки 4, 5, 7, 8, 10), не превышает 75°C. Температура точки 1, где устанавливают предметное стекло с анализируемым объектом, не превышает 36°C. Применение теплофильтра снижает нагрев предметного стекла на 4 – 5°C. Осветители с матированными деталями имеют тем более высокую температуру, чем грубее шероховатость.

Конструкция осветителя со светодиодом 1 показана на рис. 10.6.

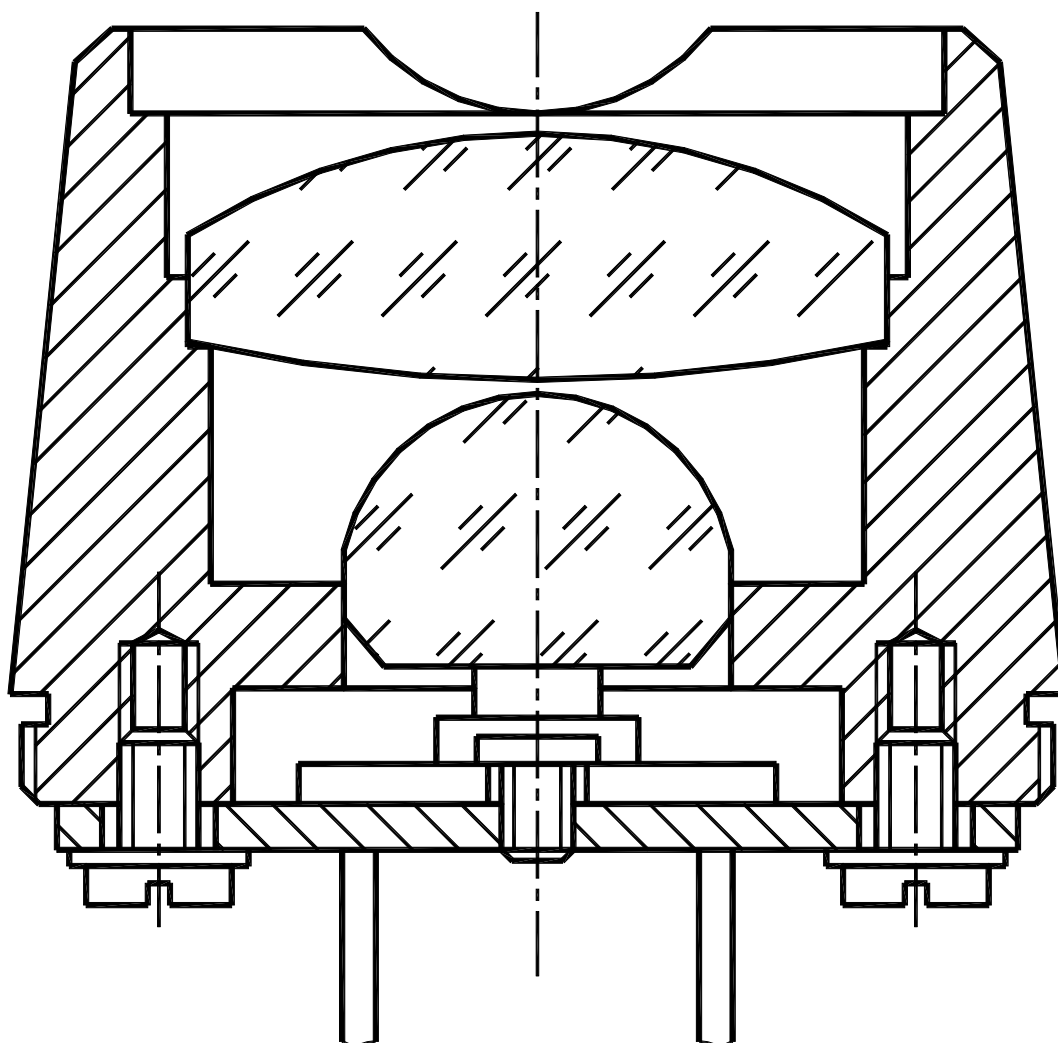


Рис. 10.6. Осветитель со светодиодом

Глава 11. Зажимные устройства и механизмы для регулирования плотности хода

Зажимные устройства обеспечивают неподвижное разъёмное соединение деталей. В оптических приборах они используются для закрепления исследуемых или измеряемых объектов, сменных насадок, направляющих и других съёмных или перемещаемых узлов.

Зажимные устройства в зависимости от величины допускаемых смещений и деформаций деталей при закреплении можно разделить на две группы:

- устройства для грубой фиксации, в которых величина смещений и деформаций деталей не нормируется;
- устройства для точной фиксации, в которых такие смещения и деформации деталей не допускаются или имеют малую величину (несколько микрометров).

Устройства, обеспечивающие зажим с минимальными смещениями, не должны вызывать сдвига деталей, что может обеспечиваться передачей минимальных усилий на детали, или полным отсутствием таких усилий в конструкции. Передача минимальных усилий на зажимаемую деталь достигается с помощью применения стальных лент или пластин, имеющих малую жёсткость в направлении, перпендикулярном к направлению движения. Такая конструкция показана на рис. 11.1а. Пружина 1 толщиной 0,1 мм закреплена на вращающемся диске 2. Её зажим производится с помощью эксцентрика 3. Для того чтобы тангенциальное усилие эксцентрика не вызывало поворота диска, введена промежуточная пружина 4.

Использование минимальных усилий часто не обеспечивает надёжного силового закрепления детали. Поэтому используют качественно новое решение. Усилие зажима к детали прикладывают так, чтобы оно не вызывало смещения, но фиксировало положение детали. Для этого в зажимное устройство вводится усилие, автоматически противодействующее прилагаемому и нейтрализующее его действие. На рис. 11.1б показаны схемы действия этих двух типов зажимных устройств. В первом варианте деталь 1 усилием P прижимается к детали 2 и при наличии зазоров между деталями или их деформации деталь 1 смещается. Во втором варианте деталь 1 фиксируется двумя деталями 3, к которым приложены усилия P , действующие в противоположных направлениях.

Конструкция устройства, в котором усилия не передаются на закрепляемую деталь, а происходит только местное сжатие детали, показана на рис. 11.1в. Закрепление диска 1 производится сухариками 2 с помощью винта 3. При вращении винта оба сухарика сближаются и сжимают пояска диска, не передавая на диск усилий, так как винт 3 может

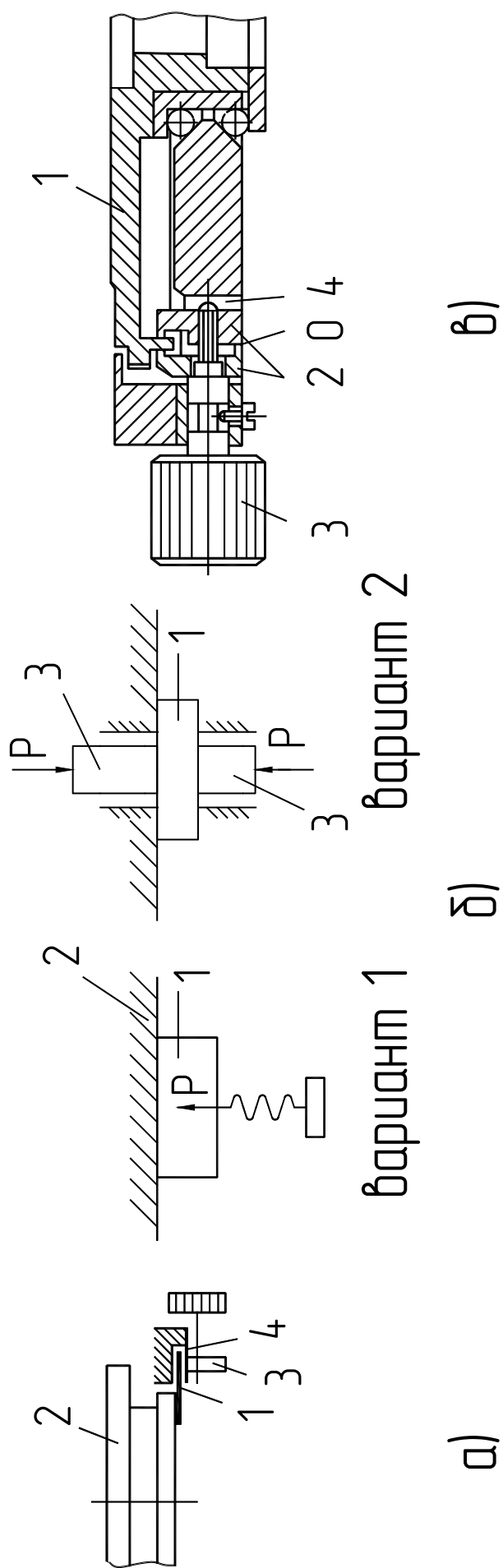


Рис. 11.1. Зажимные устройства

свободно перемещаться вдоль оси. Сухарики перемещаются в пазе 4, что предохраняет их от тангенциальных смещений, и сухарик 2 может поворачиваться вокруг точки О. Таким образом в зажимном устройстве действует замкнутая система сил, вызывающая только местное сжатие пояса диска.

Аналогичная конструкция разработана и для прямолинейных направляющих. Описанные зажимные устройства гарантируют минимальные смещения деталей не более 1 – 2 мкм.

Рассмотрим несколько конструкций зажимных устройств, используемых в менее точных соединениях. На рис. 11.2 показано зажимное устройство, используемое для закрепления съёмных окулярных насадок, имеющих установочное конусное кольцо 1. Кольцо входит в гнездо 2, имеющее два упора 3 со скосами, и зажимается винтом 4. Иногда вместо упоров ставят винты, что позволяет производить центрирование насадок. Для гарантии установки конусного кольца в гнездо диаметр D гнезда должен быть равен $D \geq d + 2htg\alpha$. Устройство обеспечивает точность установки съёмных насадок до 2 – 3 мкм.

Конструкции нескольких устройств для закрепления направляющих типа «ласточкин хвост» приведены на рис. 11.3. На рис. 11.3а показано закрепление направляющей за счёт изгиба клина 1 винтом 2 при затягивании гайки 3. На рис. 11.3б дана конструкция зажима направляющей 1 с помощью сухарика 2 винтом 3. Сухарик имеет цилиндрический выступ 4 и на него действуют пружины 5, обеспечивающие подъём сухарика при отпущенном винте.

Большие трудности возникают при креплении различных узлов и приборов в целом в условиях больших изменений температуры окружающей среды, если материалы соединяемых деталей имеют различные коэффициенты линейного расширения. Температурные деформации могут привести к заклиниванию механизмов.

На рис. 11.4 показана одна из опор 1 прибора, установленного на основании 2. На опоре жёстко закреплены стальные закалённые кольца 3, в которые насыпаны шарики 4. В кольца 3 вклеены резиновые кольца 5 и 6, ограничивающие перемещение шариков, но не препятствующие их качению. Крепление осуществляется болтом 7. Самоустановка прибора осуществляется с помощью сферических шайб 8 и 9.

При изменении температуры и различных коэффициентах линейного расширения соединяемых деталей 1 и 2 конструкция, изображённая на рисунке, обеспечивает точность крепления даже при больших расстояниях между опорами, так как между опорой 1 и основанием 2 существует трение качения.

Механизмы для регулирования плотности хода позволяют регулировать усилия и частично неравномерность движения хода механизмов, которая существенно сказывается на установочных (наводочных) перемещениях. Одна из основных причин, вызывающих

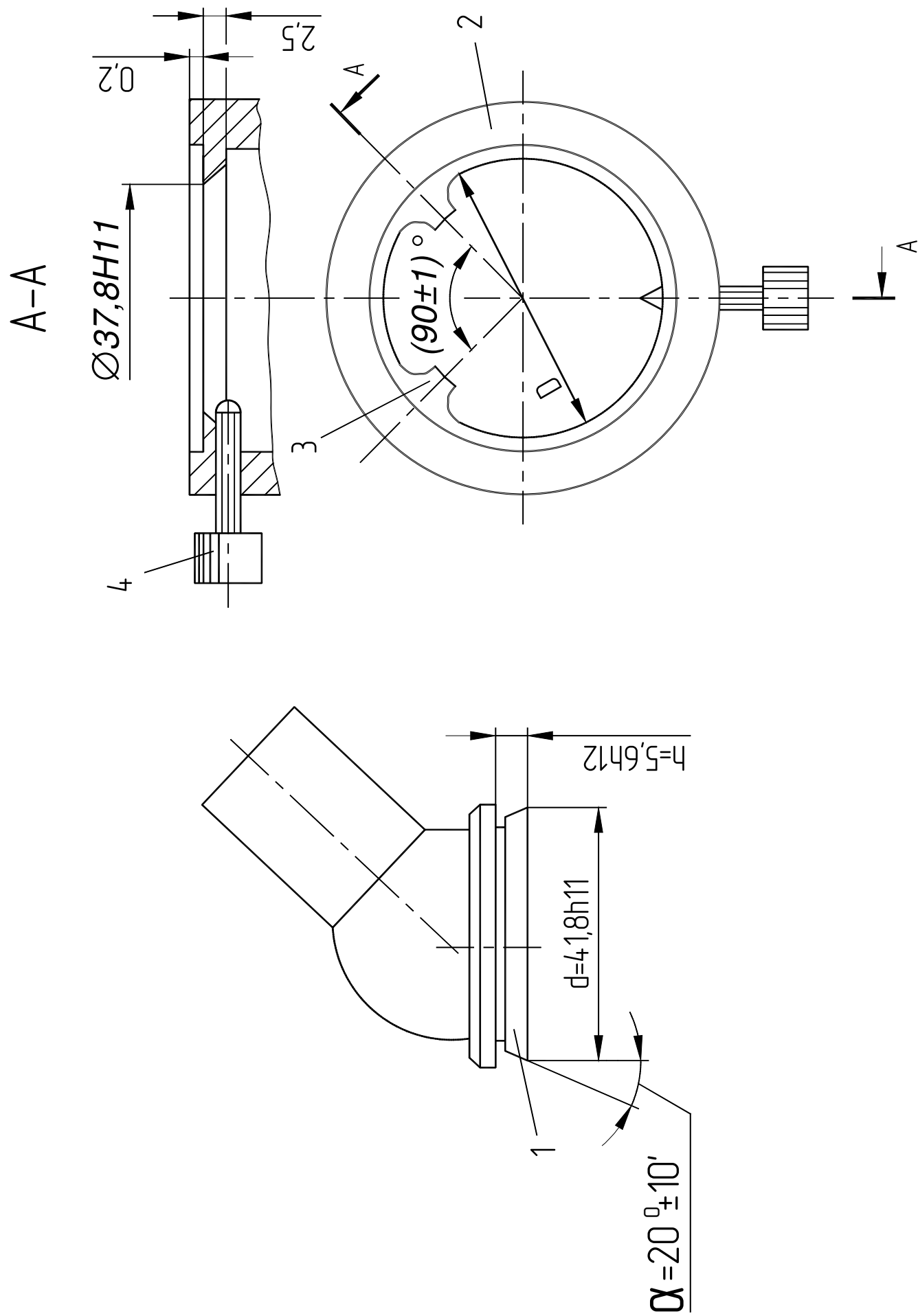


Рис. 11.2. Зажимное устройство насадок

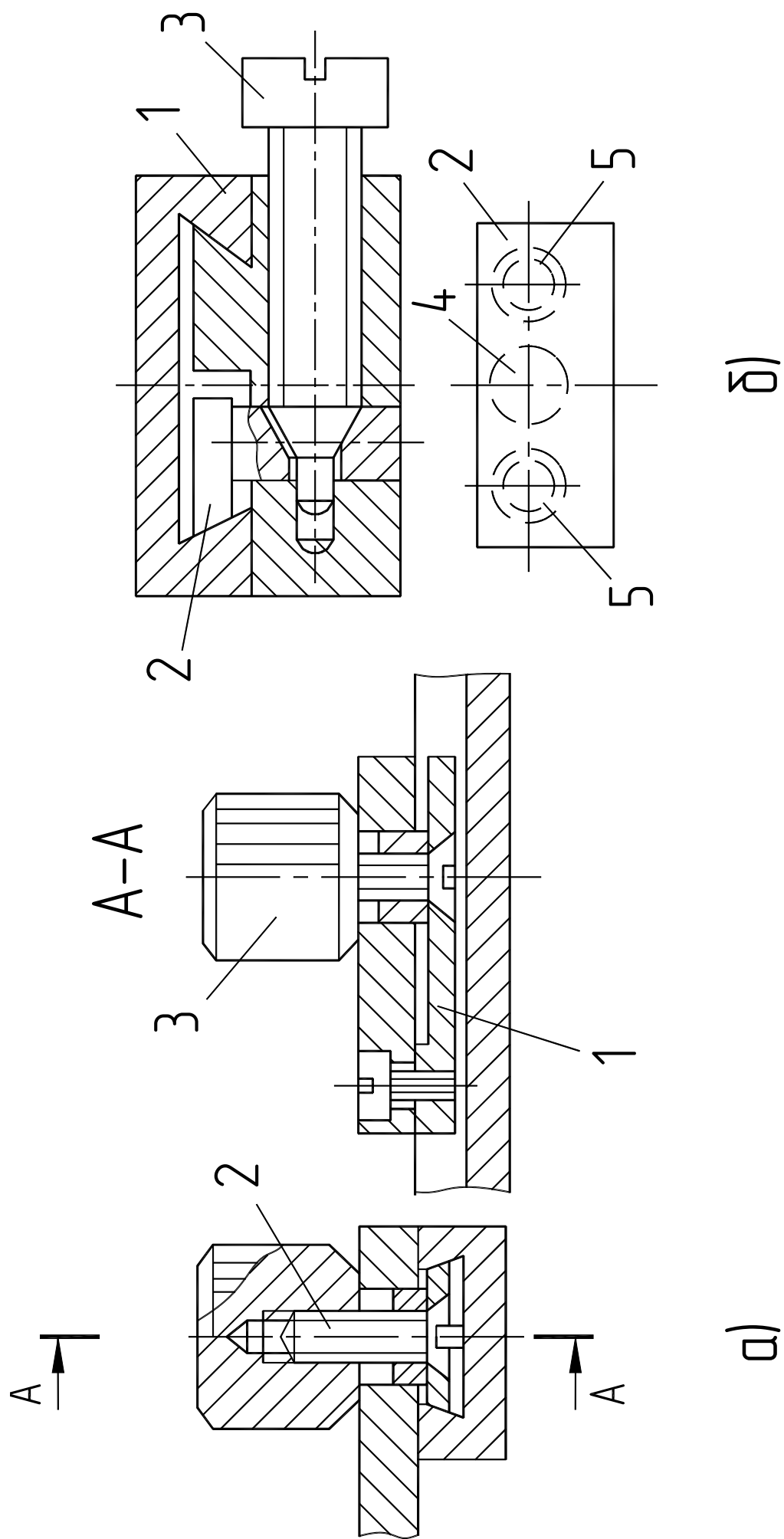


Рис. 11.3. Зажимные устройства направляющих

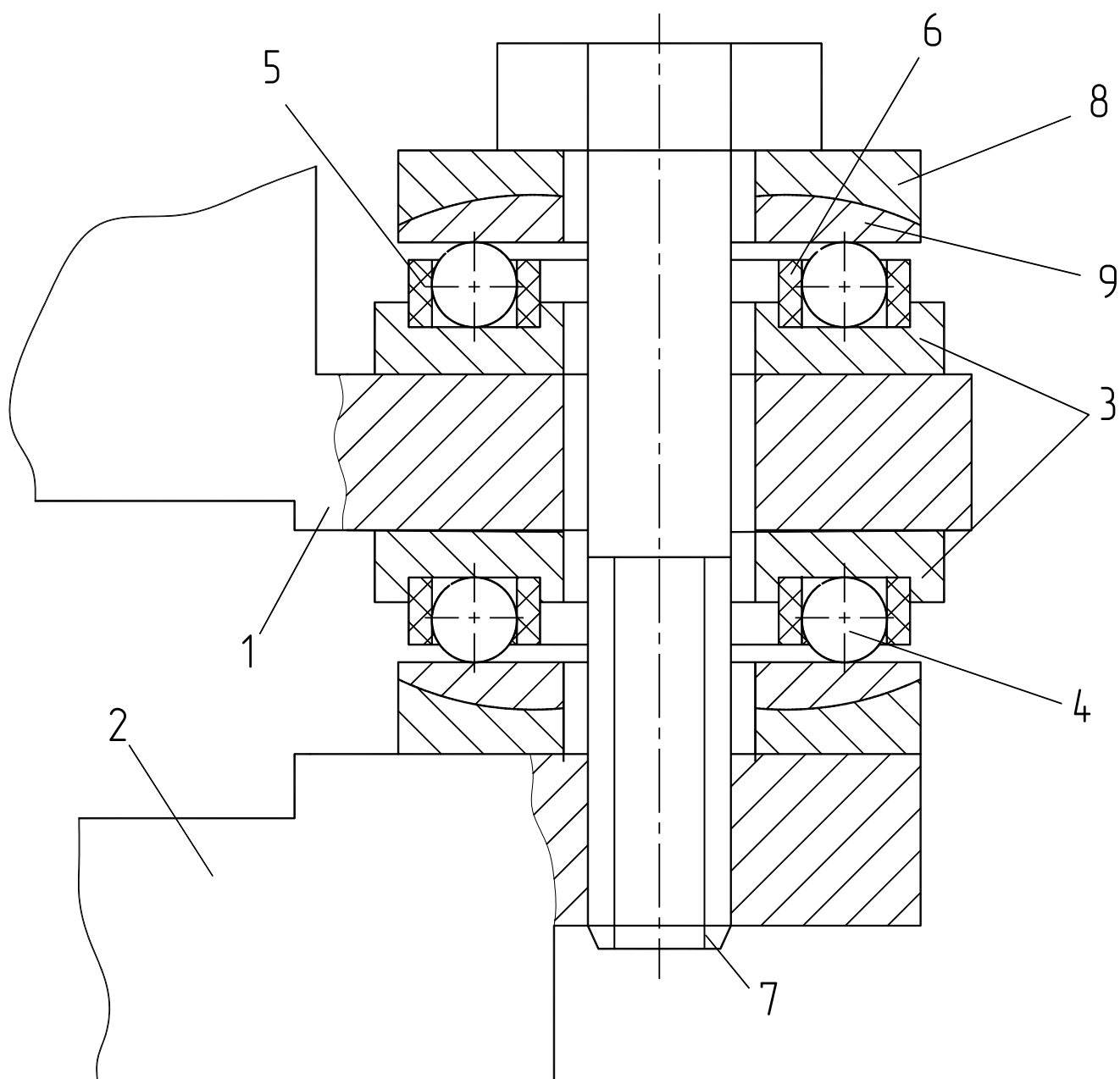


Рис. 11.4. Опора прибора

нарушение неравномерности хода, заключается в отступлении деталей от правильной геометрической формы, наличии шероховатости поверхностей, искажений профиля зубчатых и винтовых пар и т.п., которые и приводят к изменению усилий в процессе перемещения узла.

Опыт показывает, что абсолютная величина этих изменений в основном определяется особенностями конструкции, качеством сборки и изготовления деталей и мало зависит от усилий, приводящих в движение механизм. Поэтому, изменяя с помощью механизмов для регулирования плотности хода абсолютную величину приводных усилий, можно

уменьшить относительное влияние изменения усилий, возникающих в механизме и тем самым повысить плавность хода, т.е. механизмы для регулирования плотности хода выполняют роль маховика и в этой роли, как правило, используют вращательные пары с трением скольжения.

На рис. 11.5 представлена конструкция, в которой плотность хода регулируется с помощью натяга винтом 1 пружинной шайбы 2. В более сложных конструкциях (рис. 11.5б,в) изменение плавности хода осуществляют с помощью разрезных конусных втулок 1 (см. рис. 11.5б), изготовленных из пластмассы, и гаек 2. Угол конусной втулки обычно берётся в пределах $15 - 30^\circ$ во избежание заклинивания. Регулирование плавности хода производят с помощью специальных ключей, входящих в комплект прибора. Конструкция (рис. 11.5в), позволяет регулировать плотность хода без специальных ключей. При повороте рукояток 3 в противоположных направлениях правая рукоятка, имеющая гайку 2, соединённую штифтом со втулкой 4, перемещает по оси конусную втулку 1, вследствие чего и изменяется сила трения.

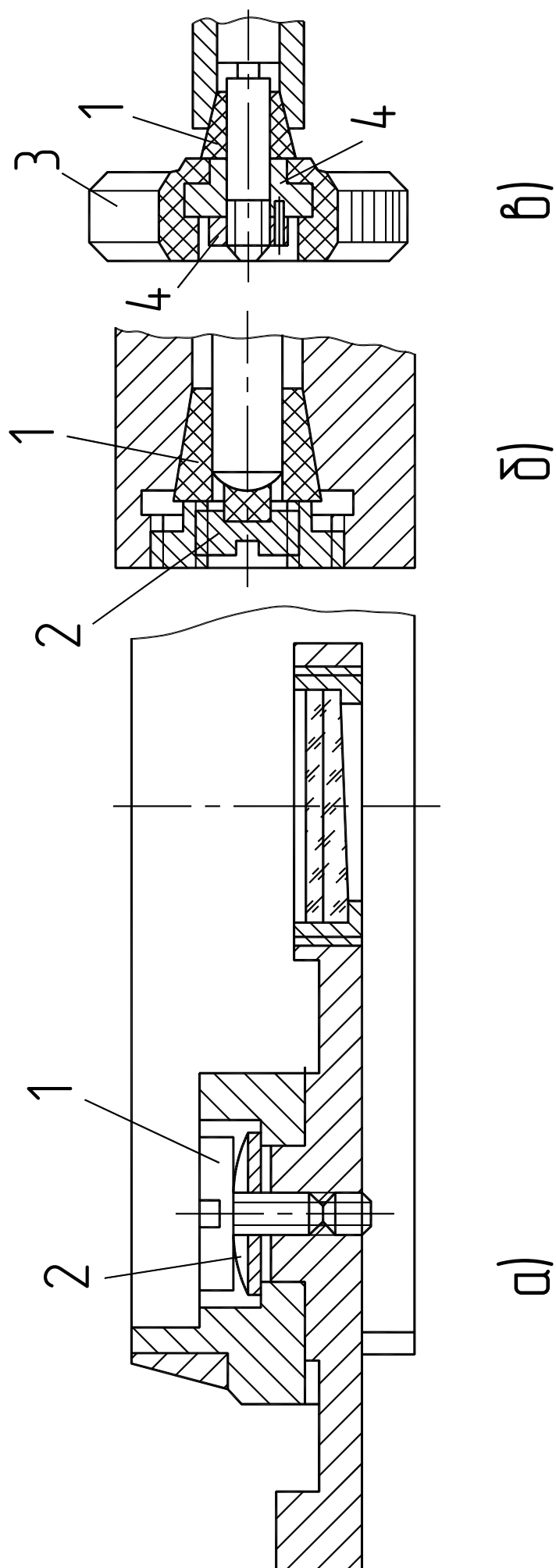


Рис. 11.5. Механизм для изменения плотности хода

Глава 12. Винтовые механизмы

Винтовые механизмы служат для преобразования вращательного движения в поступательное. Обратное преобразование встречается довольно редко (например, в механизмах отвёрток, дрелей и т.п.). Величина линейного перемещения механизмов на 1 мм прямо пропорциональна углу поворота φ , шагу резьбы P и числу заходов K , т.е.

$$l = PK\varphi / 360^\circ \text{ мм.} \quad (12.1)$$

В зависимости от использования в ОП винтовые механизмы делятся на силовые, измерительные и установочные. Силовые механизмы работают при значительных нагрузках, должны иметь высокий КПД и достаточную прочность. Измерительные механизмы используются для перемещения какого-либо узла и определения величины перемещения с заданной точностью (достижимая точность не превышает, как правило, 0,002 мм.). Установочные механизмы служат для перемещения каких-либо деталей, шкал, исследуемых объектов с целью их позиционирования с определённой точностью относительно оптической оси или иной метки. Такие механизмы должны иметь малую неравномерность движения и достаточную чувствительность.

Винтовые механизмы классифицируются также по числу звеньев (двухзвенные, трёхзвенные и многозвенные), используемому виду трения и по другим признакам.

Варианты кинематических схем винтовых механизмов можно получить, используя данные таблицы 12.1.

Таблица 12.1

Звено	Вид движения			
	Вращательное 1	Поступательное 2	Винтовое 3	Неподвижное 4
I – винт	+	+	+	+
II – гайка	+	+	+	+

Комбинируя различные варианты заданных движений и звенья механизма, можно получить $2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16$ вариантов механизмов. Обозначение механизмов (например, $I_2 - II_3$) содержит информацию о виде движения, которое сообщается каждому звену. В данном примере винт I имеет поступательное движение 2, а гайке II сообщается винтовое движение 3. Естественно, что в этом случае угол подъёма винтовой линии должен быть больше приведённого угла трения. Схема такого механизма

показана на рис. 12.1а.

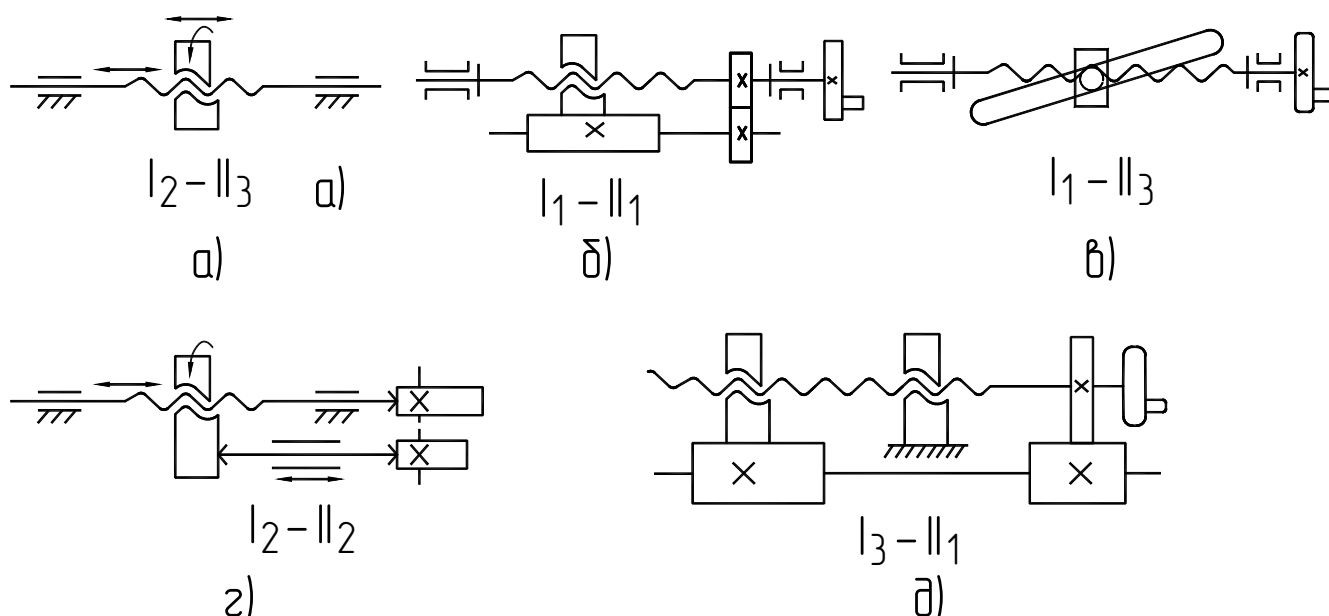


Рис. 12.1. Кинематические схемы винтовых механизмов

Винтовое движение гайке можно сообщить с помощью какого-либо дополнительного механизма (например, наклонного паза или зубчатой передачи и т.п.). В этом случае возможно алгебраическое суммирование двух движений.

В оптических приборах широко применяют варианты:

$I_3 - II_4$ — в различных видах зажимных устройств, диоптрийных механизмах, измерительных винтовых механизмах, юстировочных и фокусируемых механизмах и многих других узлах;

$I_1 - II_2$ — в измерительных винтовых механизмах, юстировочных и фокусируемых механизмах и других устройствах).

Применяют также и варианты:

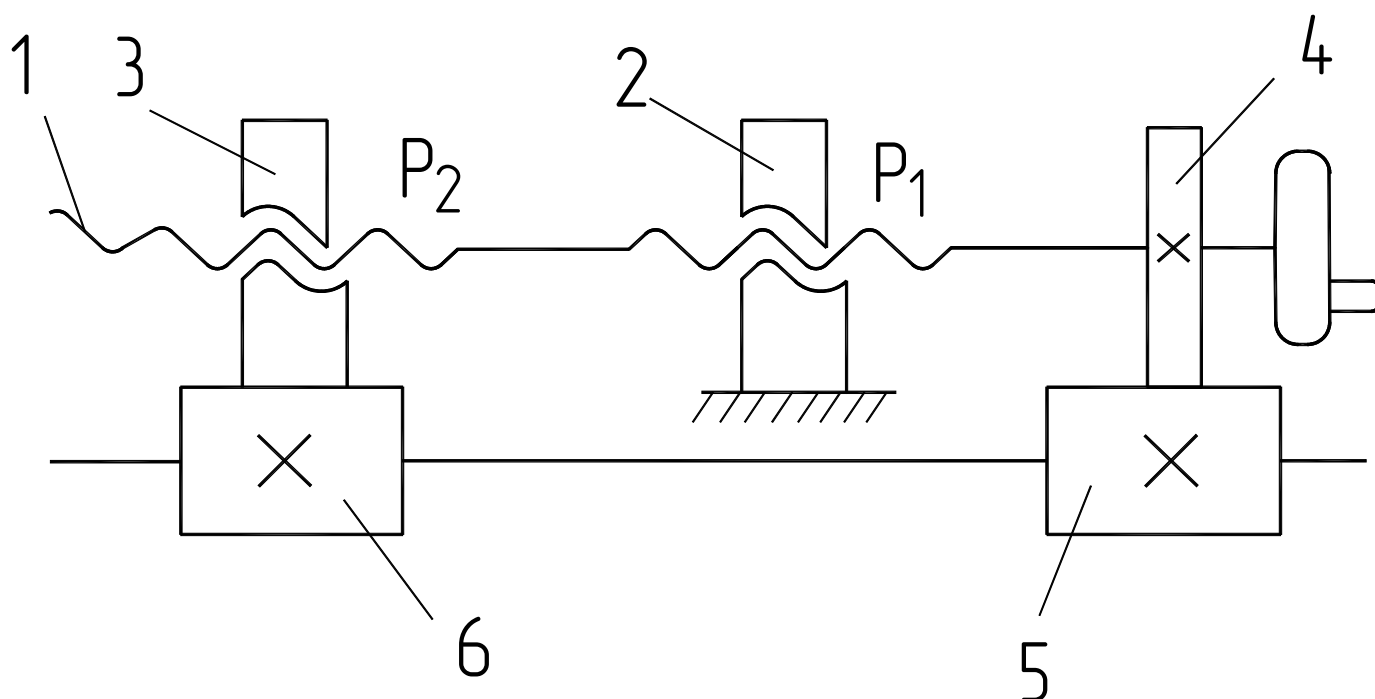
$I_2 - II_1$ — в диоптрийных и других механизмах);

$I_4 - II_3$ — в стойках оптиметров и в других оптических приборах.

Варианты $I_1 - II_1$ (рис. 12.1б); $I_1 - II_3$ (рис. 12.1в — механизм, часто используемый для коррекции шага); $I_2 - II_2$ (рис. 12.1г); $I_3 - II_1$ (рис. 12.1д) и другие требуют введения дополнительных звеньев. Вариант $I_4 - II_4$ представляет собой неподвижное резьбовое соединение деталей.

Рассмотрим подробнее дифференциальные винтовые механизмы, позволяющие получать небольшие перемещения (менее 0,1мм) при больших углах поворота и использовании резьб с крупным шагом. Некоторые из них показаны на рис. 12.1б, в, г, д. В таких механизмах гайке сообщается дополнительное вращение или поступательное перемещение,

Из зависимости, определяющей величину перемещения звеньев винтового механизма $l = PK\varphi/360^\circ$, следует, что для изменения величины l можно менять P , K , φ . Рассмотрим дифференциальный механизм, в котором изменяется величина шага P и угол поворота φ (рис. 12.2).



При вращении винта 1 в гайке 2 происходит его перемещение на величину $P_1\phi$. При этом гайка 3 совершает несколько движений:

- поступательное вместе с винтом 1 относительно гайки 2 – $P_1\phi$;
- поступательное движение относительно винта 1, равное произведению $P_2\phi$;
- относительное винтовое движение вследствие дополнительного вращения гайки 3, на которой нарезаны зубья, с помощью шестерен 4, 5 и 6.

При этом поступательное перемещение гайки 3 будет равно $P_2 i_\Phi$, где i – передаточное число зубчатой передачи.

Таким образом, поступательное перемещение гайки 3 механизма равно $l = P_1\varphi + P_2\varphi + P_2i\varphi / 360^\circ$, или окончательно

$$1 = \varphi (P_1 \pm P_2 \pm P_2 i) / 360^\circ. \quad (12.2)$$

В последней формуле указано алгебраическое суммирование составляющих общего перемещения, так как резьбы на винте могут иметь

одинаковое или разное направление, а направление вращений на винте 1 и гайке 3 может быть также в одну или разные стороны (при введении в зубчатую передачу паразитного колеса).

Возможны и другие варианты схем, например, расчленение винта 1 на два звена, соединённых зубчатой передачей. С помощью подобных механизмов можно получить перемещение гайки до нескольких микрометров на один оборот винта.

На рис. 12.3 показан дифференциальный механизм с двумя винтовыми парами. Винт 4 с рукояткой имеет две резьбы с шагами P_1 и P_2 .

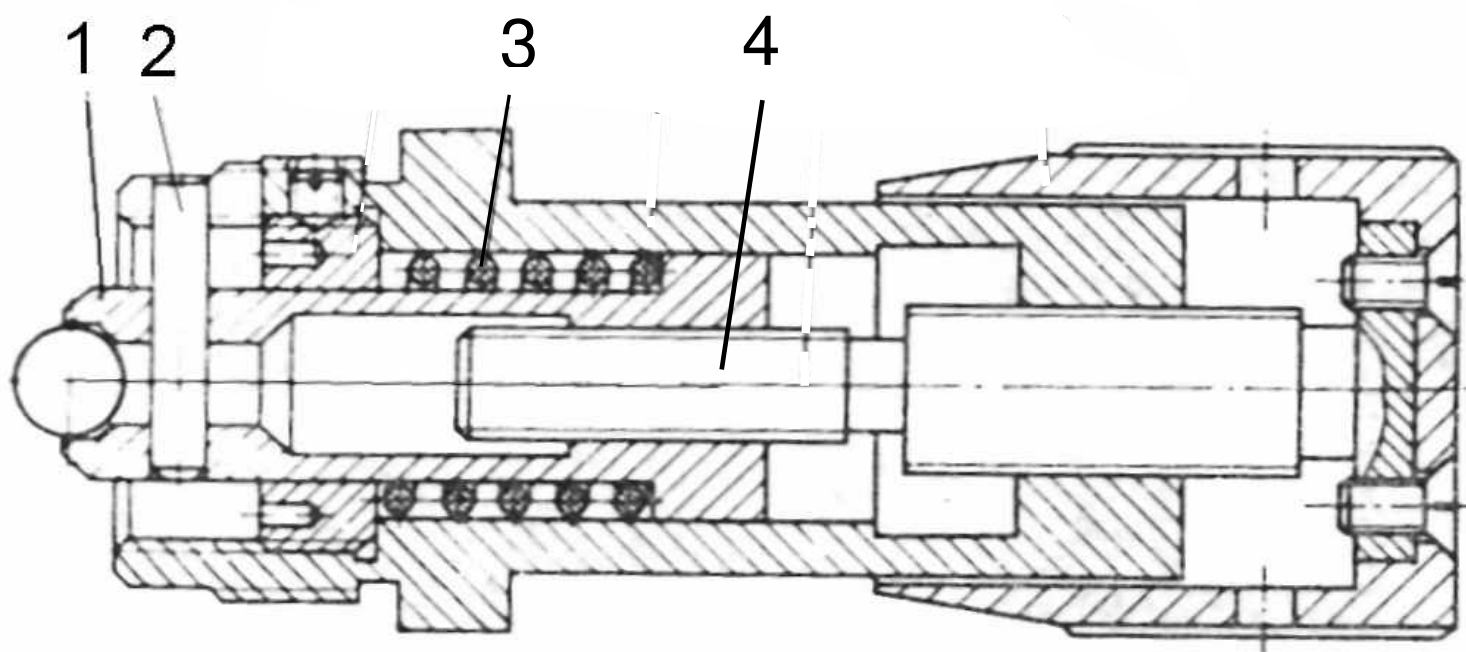


Рис. 12.3. Дифференциальный винтовой механизм

При вращении винт совершает поступательное движение с шагом P_1 . Гайка 1 перемещается при этом с шагом P_2 . Суммарное перемещение гайки 1 определяется шагом $P = P_1 - P_2$. Выборку зазоров в винтовых соединениях производит пружина 3. Штифт 2 обеспечивает только поступательное движение гайки 1.

В измерительных винтовых механизмах большое внимание обращают на устранение мёртвого хода. Наилучшим способом устранения мёртвого хода является силовое замыкание кинематической цепи. Усилие на механизм может действовать извне, со стороны направляющей, устройства, для перемещения которого служит винтовой механизм, или внутри механизма на отдельные звенья (гайку, винт). В первом случае, наиболее рациональном, усилие производит замыкание всех звеньев. Во втором случае приходится ограничиваться устранением мёртвого хода только в отдельных звеньях механизма или усложнять его конструкцию,

вводя отдельные силовые замыкания в нескольких местах. Замыкание отдельных звеньев винтового механизма, т.е. гайки и винта, выполняется осевым смещением звеньев, радиальным перемещением частей гайки, винтовым движением гайки.

С помощью устройств силового замыкания можно проводить выборку зазоров периодически по мере износа резьбы и непрерывно, т.е. автоматически в процессе износа, а также при изменениях величины зазоров по длине винта вследствие неточности его изготовления.

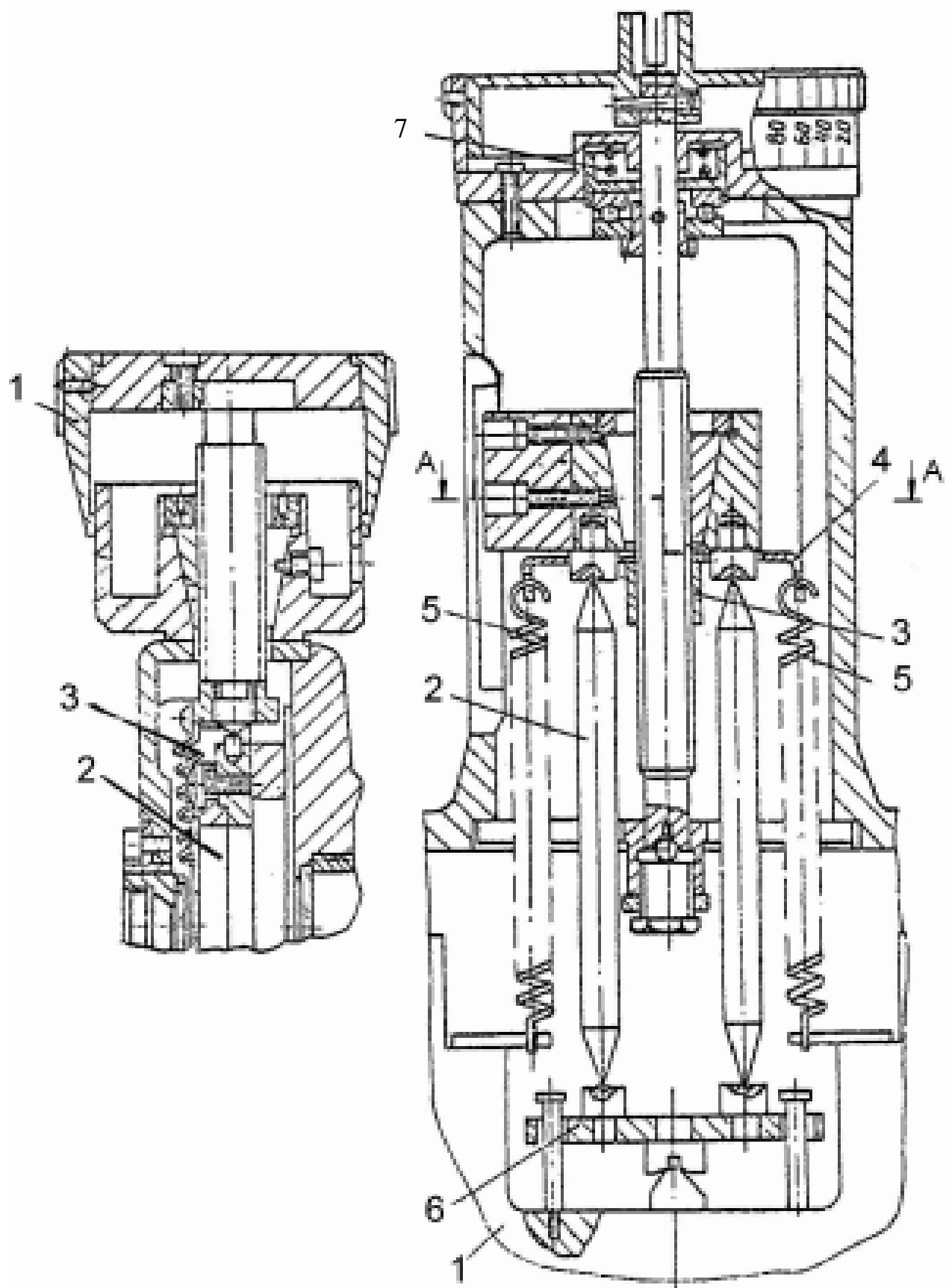
На рис. 12.4а показана конструкция винтового механизма окулярного микрометра, в которой компенсация мёртвого хода винтового механизма 1 и направляющей 2 выполняется с помощью пружины 3, осуществляющей силовое замыкание всех звеньев механизма. Такая схема выбирает мёртвые хода в механизме автоматически, как по мере износа звеньев, так и независимо от погрешностей изготовления винта.

На рис. 12.4б представлена схема устранения мёртвых ходов вторым способом, т.е. устранением частных причин, вызывающих мёртвые хода в тех или иных соединениях. Устранение мёртвого хода в основной гайке достигается с помощью дополнительной гайки 3 за счёт осевого смещения деталей. Усилие пружин 5 через каретку столика 1 и иглы 2 передаётся на основную гайку, а через скобу 4 на дополнительную гайку 3. Осевой люфт винта устраняется пружиной 7. Рычаг 6 компенсирует разность длины игл 2.

Радиальное сжатие гаек с помощью торцевых гаек за счёт их конической формы служит главным образом для регулирования сил трения в винтовом соединении. В других конструкциях такой способ часто используется и для уменьшения мёртвого хода.

На рис. 12.5 показаны иные конструкции для устранения мёртвого хода. На рис. 12.5а приведена конструкция с шарнирными полугайками 1 с устранением зазоров за счёт сближения их пружинами 2. Усилие пружин при их радиальном расположении значительно меньше, чем при осевом. На рис. 12.5б приведена конструкция для автоматического устранения зазоров с помощью винтового перемещения гаек через втулки 3 и 5. Гайки 4 и 7 имеют внутреннюю и наружную резьбы разного шага (шаг наружной резьбы больше шага внутренней резьбы). Гайки ввинчены во втулку 5, зафиксированную в корпусе от поворота штифтом 6, и закручиваются пружинами 2 и 8 в направлении стрелок. Перемещаясь под действием пружин по наружной резьбе, гайки выбирают зазор и прижимаются к виткам ходового винта 1, устраняя зазор в резьбе.

В винтовых механизмах, имеющих винт 1 (рис. 12.6а, б) и гайку 2, в качестве тел качения используются шарики или ролики 3. Такие механизмы имеют высокий КПД (до 0,9 по сравнению с 0,2 – 0,4 передач с трением скольжения), возможность полного устранения зазора в резьбе и почти полную независимость силы трения от скорости, что способствует обеспечению равномерности движения.



a)

б)

Рис. 12.4. Компенсация мертвого хода в винтовых механизмах

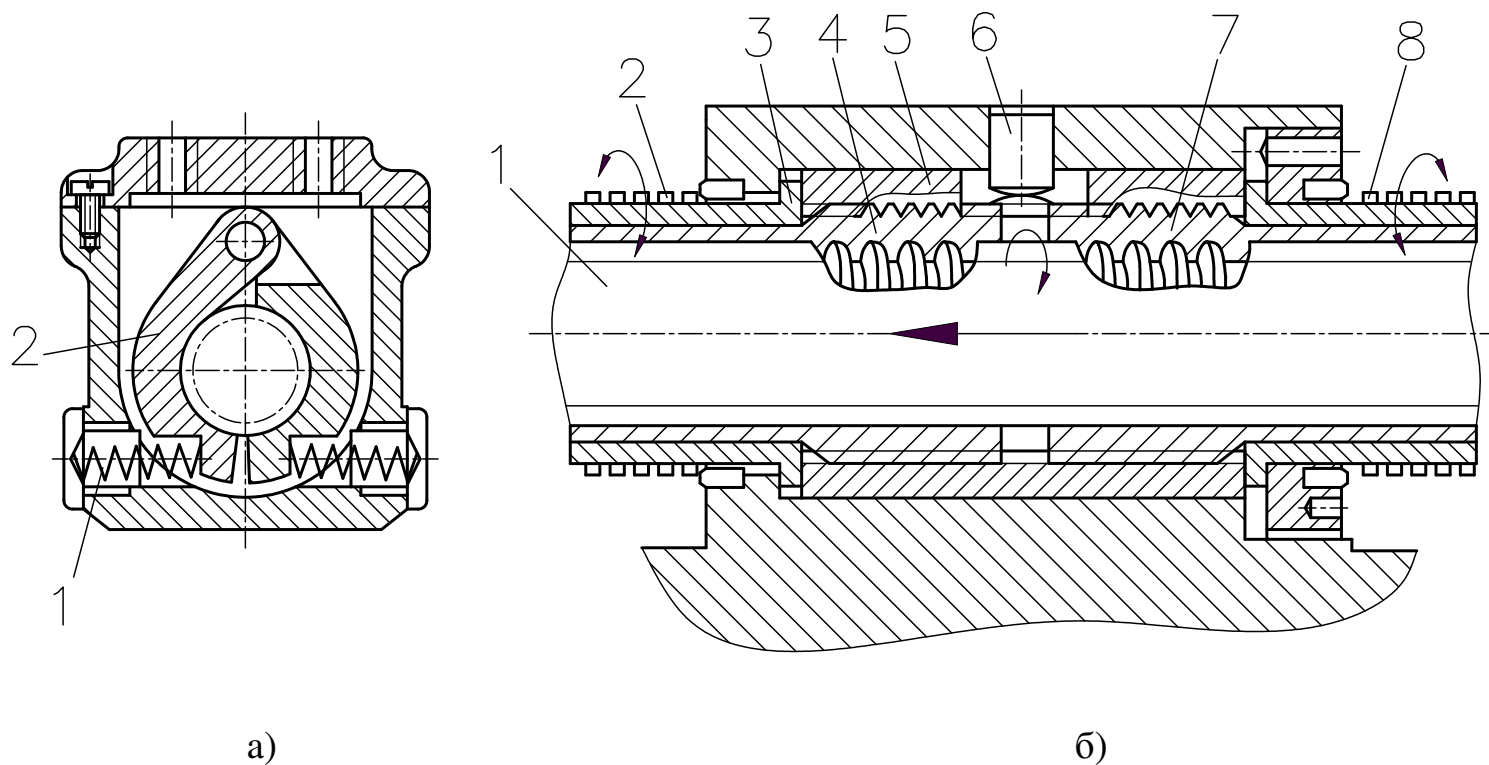


Рис. 12.5. Конструкции гаек для устранения мертвого хода

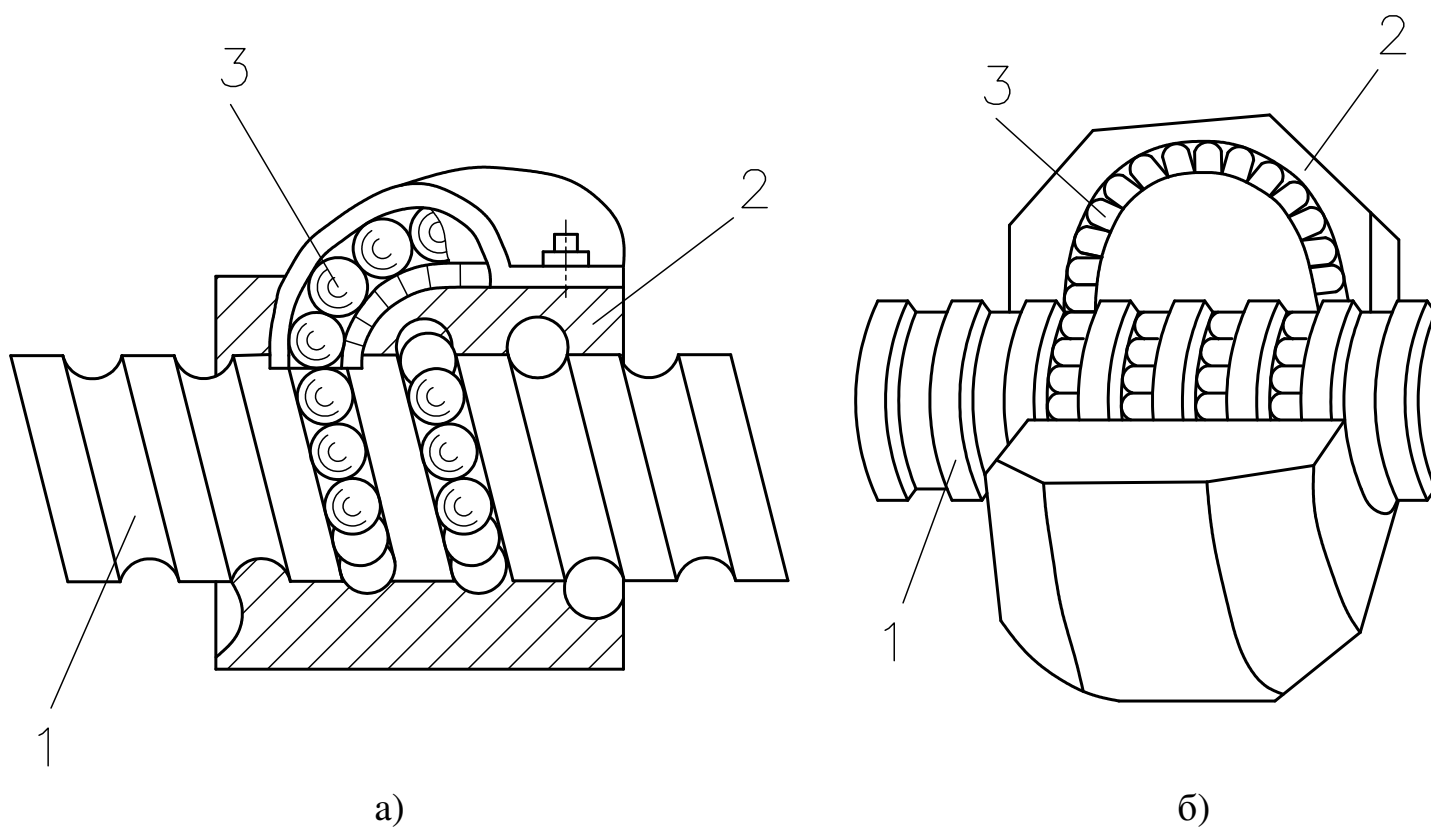


Рис. 12.6. Винтовые механизмы с трением качения

Различают механизмы с возвратом (рис. 12.6) и без возврата тел качения. Механизмы с возвратом тел качения обеспечивают большую величину перемещения. Основные варианты профилей резьбы показаны на рис. 12.7.

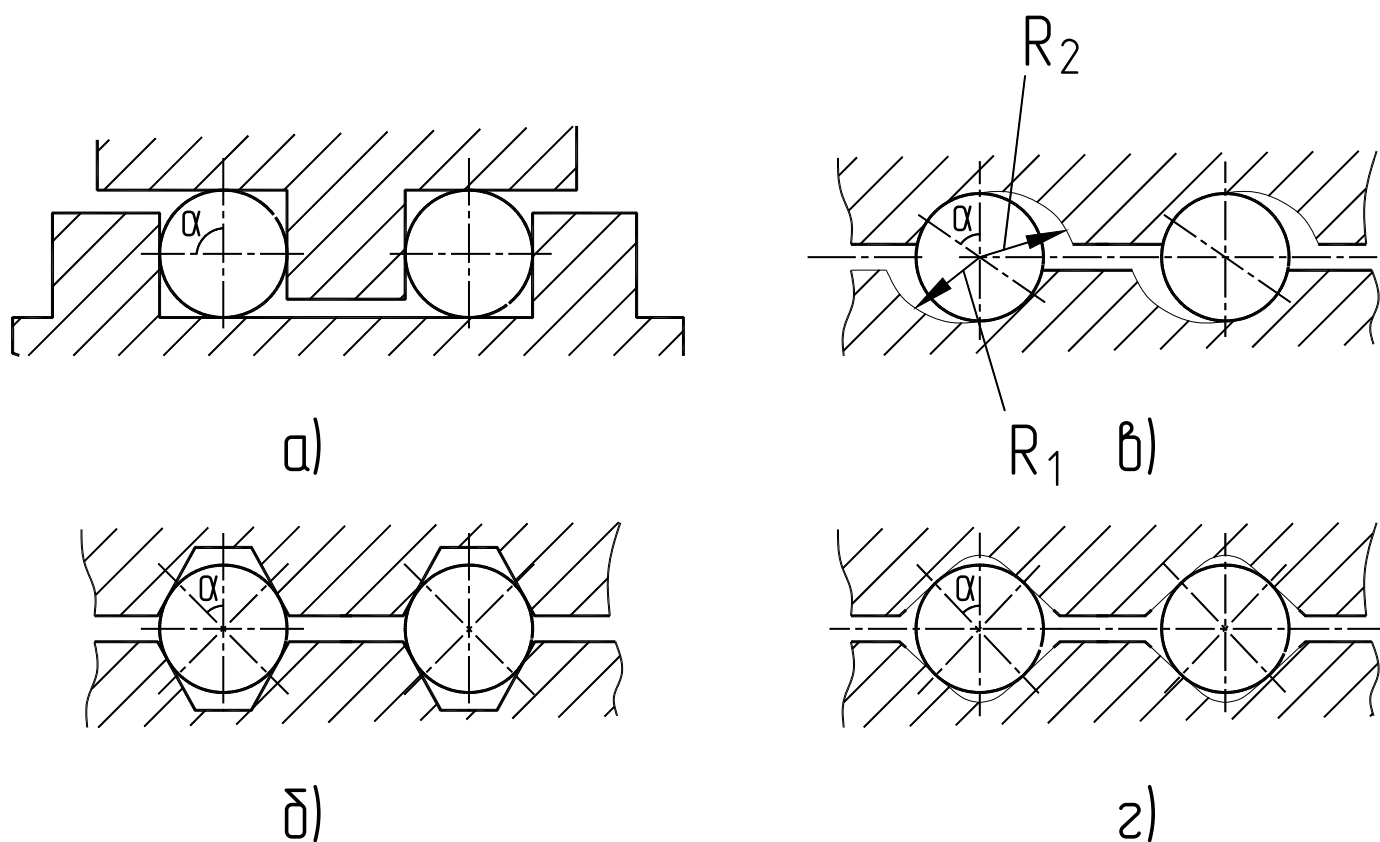


Рис. 12.7. Профили резьбы

Прямоугольный профиль (рис. 12.7а) и трапецеидальный профиль (рис. 12.7б) наиболее просты в изготовлении, однако по сравнению с полукруглым профилем (рис. 12.7в) и профилем, образованным двумя дугами (рис. 12.7г), они имеют более низкую нагрузочную способность. Для полукруглого профиля принимают $R_1/R_2 = 0,95$, для профиля, образованного двумя дугами, отношение радиуса дуги R_d к R_1 должно находиться в пределах от 1,4 до 2,2. Угол контакта α рекомендуется принимать равным $45 - 60^\circ$.

КПД передачи равен

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} \lambda}{\operatorname{tg} (\lambda + \beta)}, \quad (12.3)$$

где β – приведённый угол трения, который определяется соотношением

$$\operatorname{tg} \beta = f_k / R_1 \sin \alpha,$$

где: f_k – коэффициент трения качения, см. (обычно равен 0,001),
 R_1 – радиус шарика, см.

Экспериментальное исследование узлов, в которых применялись винтовые механизмы с трением скольжения и качения, показали следующее:

- остаточные деформации после снятия нагрузки составили у передач качения не более 0,2 мкм, у передачи скольжения – до 2 мкм;
- момент холостого хода передач качения примерно в десять раз меньше, чем у передач скольжения.

Таким образом, шариковые винтовые механизмы имеют существенно лучшие технические показатели, чем механизмы с трением скольжения.

В настоящее время функциональные узлы шариковых винтовых механизмов изготавливаются отдельными фирмами.

Глава 13. Биноккулярные и тринокулярные насадки микроскопов

При использовании микроскопов для диагностики в лабораториях оператор выполняет достаточно сложную работу в течение шести – восьми часов с большой нагрузкой на зрение. При многолетнем использовании монокулярного наблюдения у оператора может возникнуть профессиональная болезнь глаз. Поэтому у большинства микроскопов, предназначенных для диагностики объектов, выполнения технологических операций в микроэлектронике, биотехнологии и т.д. предусмотрено использование биноккулярного наблюдения с помощью биноккулярных насадок. В тех случаях, когда необходима передача изображения на дополнительный приёмник излучения (фотокамеру, телевизионную трубку, ЭОП и т.д.) применяют тринокулярные насадки, снабжённые дополнительным каналом.

Базовым параметром, определяющим связь насадок с микроскопом, является механическая длина тубуса, включающая две составляющих. Первая составляющая у объективов с конечной длиной тубуса (обычно 150 мм) определяет расстояние от промежуточной плоскости изображения до опорной плоскости объектива. Вторая составляющая, равная $(10 \pm 0,3)$ мм, у объективов с конечной и бесконечной длиной тубуса определяет положение опорной плоскости окуляра относительно плоскости изображения. Опорная плоскость расположена обычно выше плоскости изображения, ближе к глазу оператора. У объективов с длиной тубуса “бесконечность” в ход лучей вводится дополнительная линза, в задней фокальной плоскости которой образуется изображение объекта. У таких объективов механическая длина тубуса может дополнительно увеличиваться до 100 мм, но расстояние до опорной плоскости окулярной трубки, равное $(10 \pm 0,3)$ мм, сохраняется.

По существующим стандартам наружный диаметр трубок насадок равен 25 и 30 мм, а внутренний – 23,2 и 27 мм.

Расстояние между окулярными трубками бинокуляров находится в пределах 56 – 72 мм (см. также табл. 2.5). Для обеспечения комфортной работы зрительного канала допуск параллельности оптических осей в горизонтальной плоскости на угол схождения (угол конвергенции) составляет $20'$; на угол расхождения (угол дивергенции) – до $60'$. В перпендикулярной плоскости допуск параллельности равен $15'$. Окулярные трубки центрируются с допуском 0,1 мм. Эти требования должны выполняться и при изменении расстояния между окулярными трубками.

Для максимального удобства оператора при визуальных исследованиях необходимо обеспечивать оптимальное положение выходных зрачков окуляров, которое зависит от положений выходных зрачков над основанием стола и наклоном окулярных трубок насадки (см. гл. 2.9). Оптимальный угол наклона составляет 37° с горизонтальной осью.

В насадках микроскопов в зависимости от высоты приборов используются углы 0, 20, 30 и 45°. Наилучшие условия наблюдения обеспечивают насадки, имеющие конструкцию, позволяющую изменять угол наклона в пределах 30 – 40° (эргономические насадки). Использование таких насадок позволяет создать комфортные условия работы для мужчин и женщин, разница высоты глаз которых в положении сидя составляет 8 см (см. табл. 2.5).

На рис. 13.1 приведены две схемы бинокулярного наблюдения в микроскопах – без промежуточного изображения (рис. 13.1а) и с промежуточным изображением (рис. 13.1б). На первой схеме (см. рис. 13.1а) изображение объекта 1 объективом 2 через зеркальные и светоделительные элементы 3 проектируется линзой 5 в плоскость полевой диафрагмы окуляров 4. Положение окуляров определяется плоскостями А. Наводка на резкое изображение производится перемещением объекта 1 или перемещением всей ОС.

Для коррекции близорукости или дальнозоркости (аметропии) глаза в этом случае достаточно снабдить диоптрийным перемещением только один из окуляров.

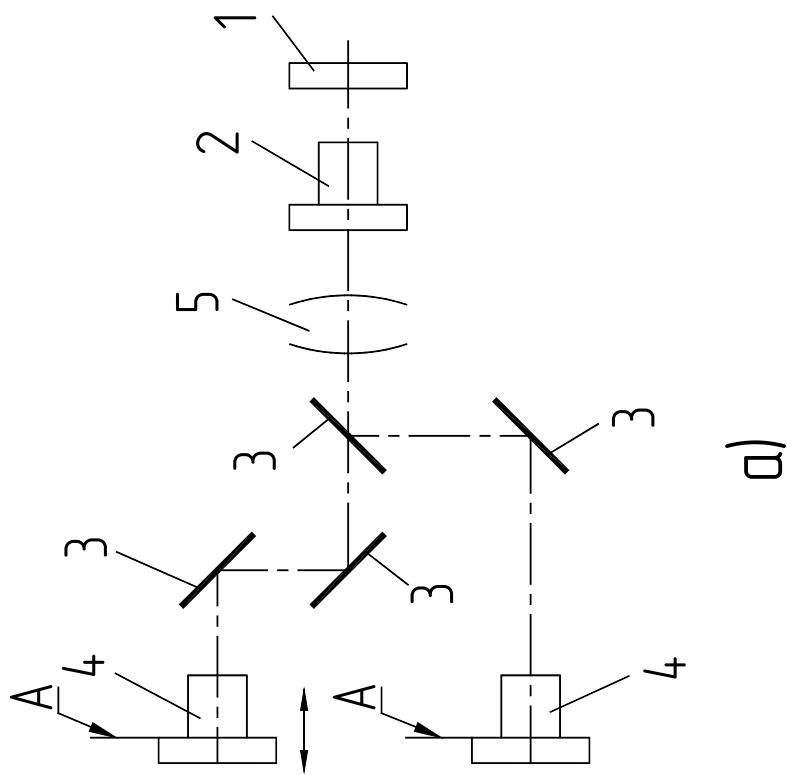
На другой схеме (см. рис. 13.1б) изображение объекта 1 объективом 2 и линзовой системой 5 проектируется на шкалу (сетку, экран ЭОПа и т.п.) 6. Затем совмещённое изображение объекта и сетки рассматривается через окуляры 4. Поскольку в этом случае необходимо сфокусировать каждый окуляр и компенсировать аметропию глаз, диоптрийное перемещение должен иметь каждый окуляр.

Диапазон диоптрийного перемещения X определяется по формуле

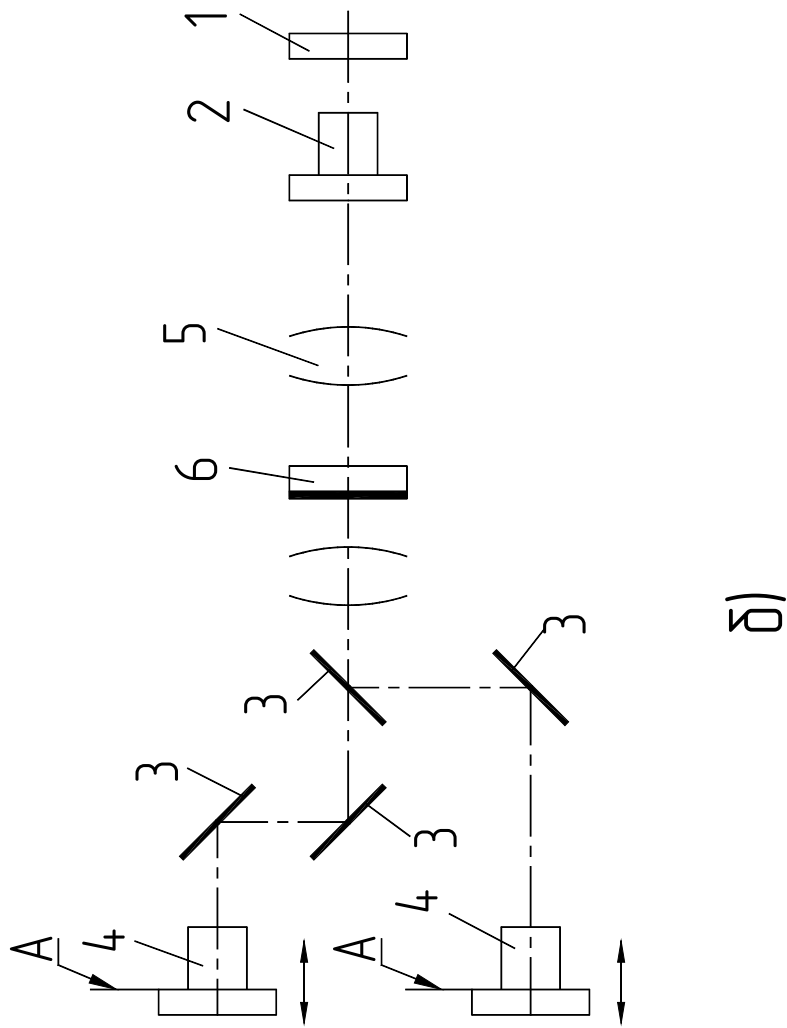
$$X = \pm \frac{N(f')^2}{1000}, \text{ мм}, \quad (13.1)$$

где N – рефракция глаза в диоптриях,
 f' – фокусное расстояние окуляра, мм.

Обычно диоптрийное перемещение должно компенсировать рефракцию глаза, равную ± 5 дптр. Поскольку диоптрийное перемещение составляет несколько миллиметров, его осуществляют с помощью многоходовой резьбы. При этом окулярные трубки насадок имеют винтовое или поступательное движение. На рис. 13.2 даны три варианта диоптрийных механизмов окулярных трубок. Вариант с винтовым движением (рис. 13.2а) наиболее простой, но и наименее точный. Обычно длина резьбы трубки примерно равна диаметру окулярной части и составляет 20 – 30 мм. Точность соосности и наклонов окулярных трубок определяется главным образом допусками на изготовление резьбы. Вследствие большой величины допусков только на средний диаметр



а)



б)

Рис. 13.1. Схемы бинокулярных наблюдений

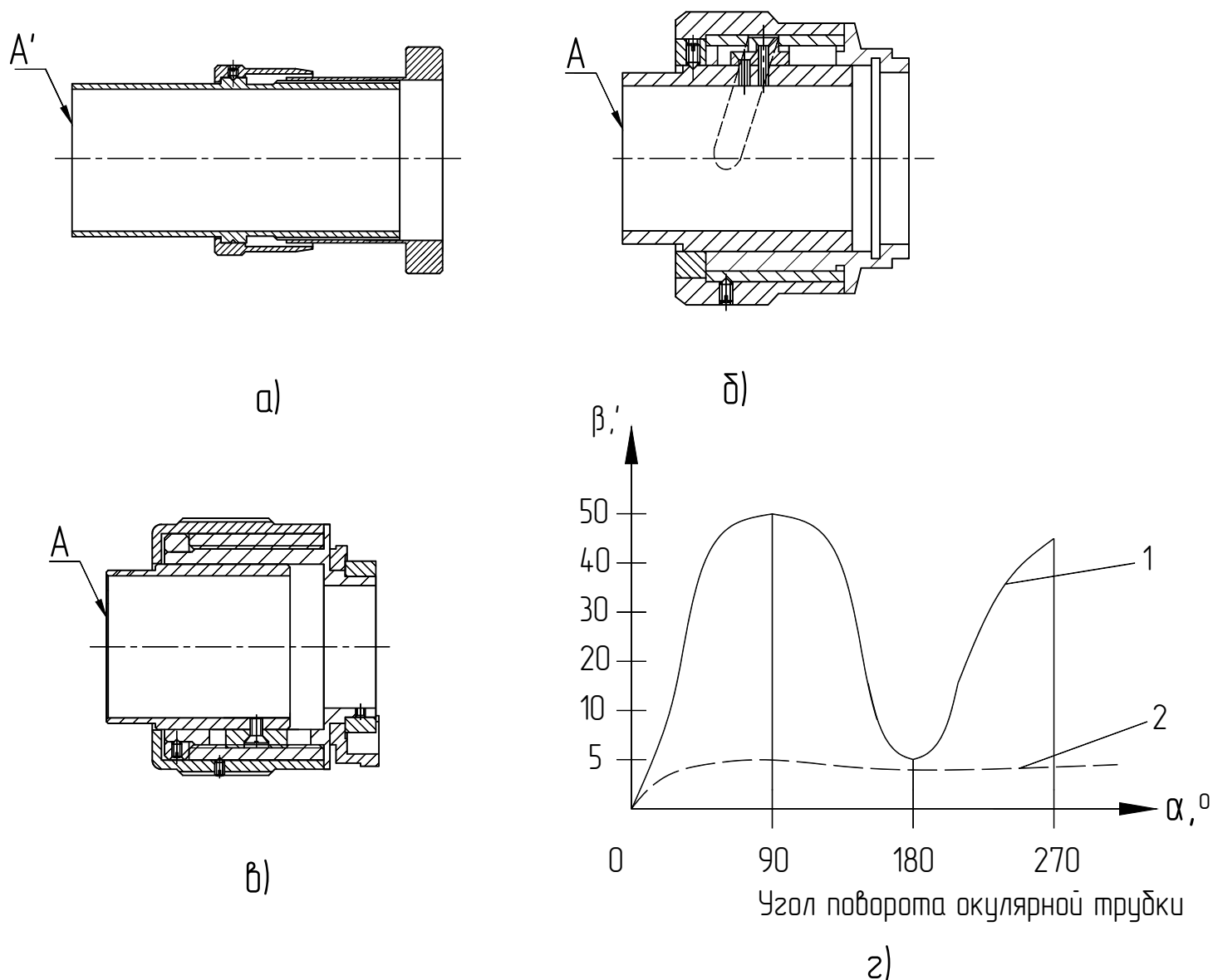


Рис. 13.2. Диоптрийные механизмы насадок

наклоны могут достигать $20 - 30'$. При исследовании вариантов, показанных на рис. 13.2б, в, имеющих цилиндрические окулярные трубки, наклоны не превышают $4 - 6'$. Кроме того, при винтовом движении (рис. 13.2а) качение торцов трубок имеет синусоидальный характер, а при поступательном движении (рис. 13.2б, в) торцы трубок имеют постоянный наклон. На рис. 13.2г показаны экспериментальные кривые, характеризующие движение опорных торцов насадок. Кривая 1 характеризует изменение угла наклона опорного торца "А" окулярной трубки, показанной на рис. 13.2а. Торец имеет биение до 1° по осям Х и У при вращении рукоятки диоптрийного механизма на 270° . Кривая 2 (см. рис. 13.2г) показывает биение торцов "А" вариантов диоптрийных механизмов с поступательным движением окулярных трубок, представленных на рис. 13.2б, в. Наглядно видна разница в точности перемещения окуляров двумя типами механизмов.

На рукоятках диоптрийных механизмов устанавливают отсчётные шкалы, обычно в пределах ± 5 дптр, по которым оператор может предварительно установить аметропию своего глаза. Рассмотрим расчёт шкалы диоптрийного механизма.

Используем диоптрийный механизм для фокусирования окуляра 10^x . Диапазон перемещения X , определённый по формуле (13.1), составляет для величин ± 5 дптр

$$X = \frac{5 \times 625}{10^3} = \pm 3,125 \text{ мм}$$

и 0,625 мм на одну диоптрию. Так как диоптрийная шкала окуляра не может занимать более 360° , для общего перемещения окуляра на 6,25 мм необходимо использовать многоходовую окулярную резьбу, например, восьмизаходную с шагом $P = 1,5$ мм. Небольшой запас в перемещении позволяет регулировать нулевое положение. Угол поворота α определяется из формулы

$$\alpha = \frac{360^\circ N (f')^2}{1000 \times k \times P} . \quad (13.2)$$

Изменение расстояния между окулярными трубками выполняется с помощью вращательного или поступательного перемещения (рис. 13.3).

В первом случае (рис. 13.3а) при вращении окулярных трубок 1 вокруг оси О не происходит изменения расстояния между опорными торцами. Во втором случае (рис. 13.3б) при поступательном перемещении трубок происходит изменение расстояния между опорными торцами окуляров и объективом. Для компенсации этого смещения опорных торцов окуляры дополнительно перемещают на соответствующий размер с помощью диоптрийного механизма, который в этом случае устанавливается на каждой окулярной трубке, или с помощью дополнительных рычажных, клиновых и других механизмов.

Обычно окуляры имеют наружный диаметр 23,2 мм и устанавливаются внутрь окулярных трубок. Такая конструкция не позволяет получить поле зрения более 20 мм. Поскольку плоскость изображения расположена внутри окулярной трубки, для смены шкал и сеток, устанавливаемых в этой плоскости, приходится вынимать окуляр и производить в нём смену шкал и сеток. Поэтому в последних моделях насадок опорную плоскость располагают ниже плоскости изображения микроскопа, что обеспечивает удобную смену шкал и сеток через паз в корпусе окуляра. Кроме того, увеличивают внутренний диаметр окуляра и устанавливают его на наружный диаметр окулярной трубки (рис. 13.4).

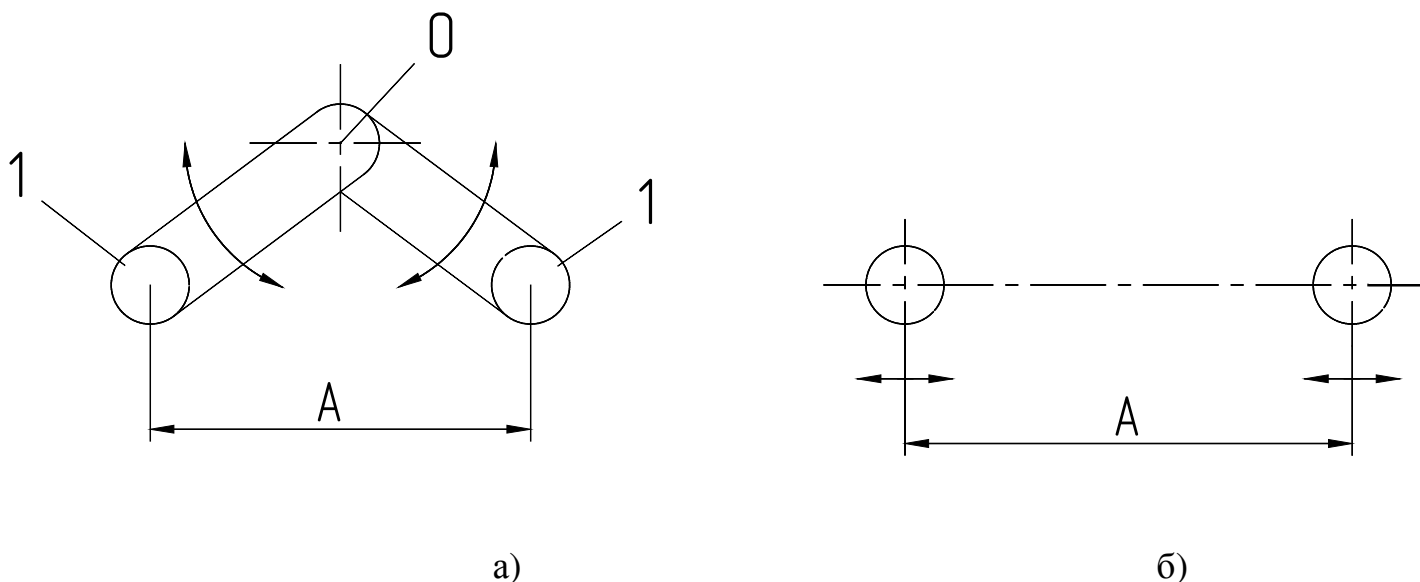


Рис. 13.3. Изменение межзрачкового расстояния А

Такие изменения позволяют увеличить поле зрения до 23 – 24 мм.

Рассмотрим оптические схемы различных типов насадок. Ранее отмечалось, что для удобства наблюдения насадки имеют наклонное расположение окулярных трубок. Поэтому обычно насадки имеют входную оптическую систему, обеспечивающую наклон насадок с помощью призмы или зеркал, и бинокулярную систему наблюдения. В тринокулярных насадках предусматривается дополнительный канал, обеспечивающий проекцию изображения объекта на приёмник излучения (фото-, телесистемы, ЭОП и т.п.). Использование зеркал во входной системе позволяет улучшить качество изображения, за счет устранения рассеянного света и хроматизма.

На рис. 13.5 показаны призмённая бинокулярная и тринокулярные насадки, состоящие из входной призмы 1 и бинокля 2. Бинокулярная насадка (рис. 13.5а) имеет угол наклона окулярных трубок 30° , а тринокулярная насадка (рис. 13.5б) – 20° . Входная призма 1 у тринокулярной насадки переключается и световой поток может полностью направляться в бинокль 2 и в третий канал 3.

Бинокулярное наблюдение может осуществляться и с помощью одной линзовой системы (рис. 13.6). На рис. 13.6а наблюдение экрана ЭОПа 1, устанавливаемого в инфракрасном дефектоскопе зерна, производится с помощью окуляра 2, имеющего увеличение $4^{\times}$. Размер светового диаметра последней линзы позволяет наблюдать экран двумя глазами.

Бинокулярный окуляр (рис. 13.6б) включает в себя окуляр 1, имеющий выходной зрачок, расположенный на большом расстоянии от последней линзы. Призмы – ромбы 2 разделяют световой пучок на две части.

В последнее время начинают использовать в микроскопах эргономические насадки, позволяющие устанавливать высоту выходных

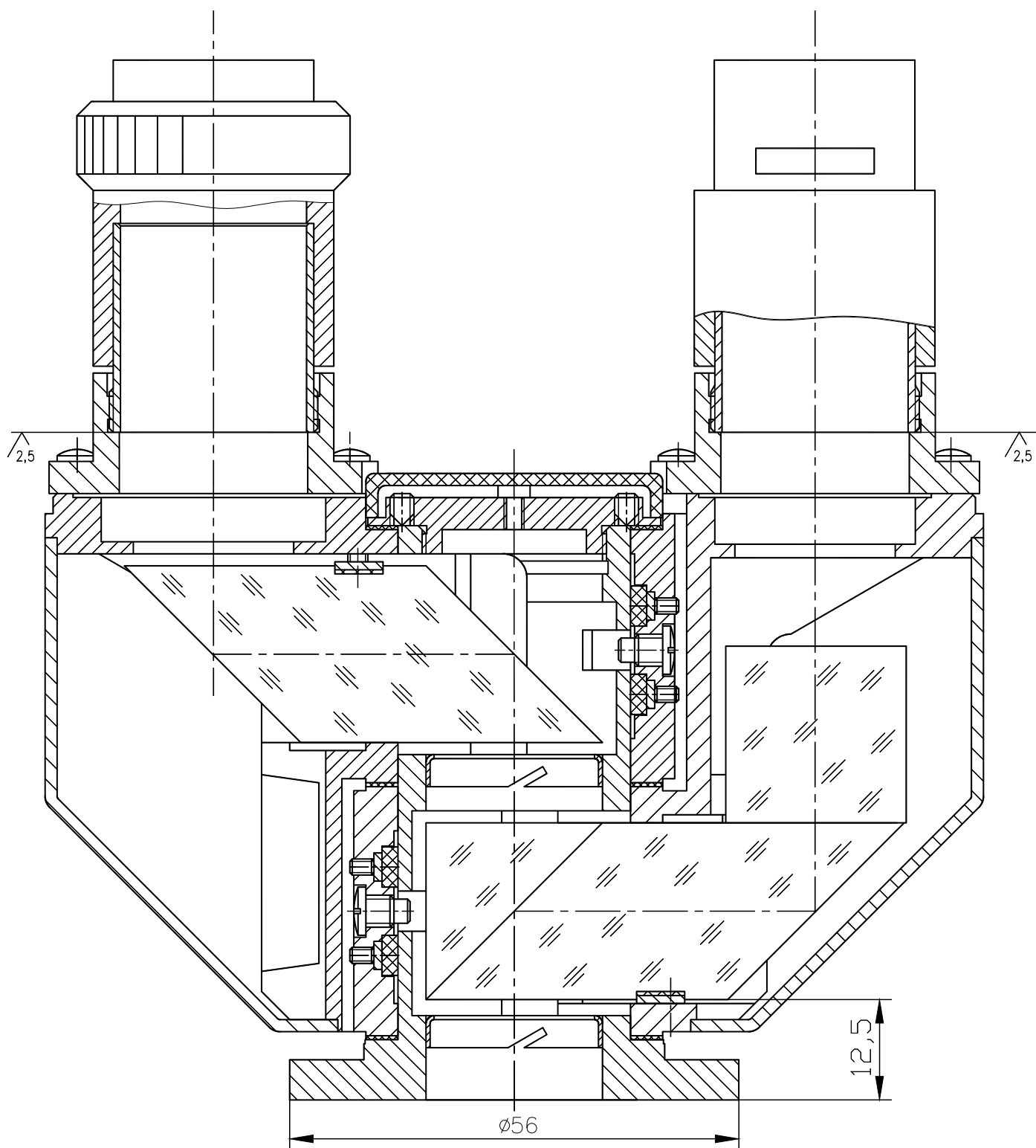


Рис. 13.4. Биноклярная насадка со смещенной плоскостью изображения

зрачков микроскопов в удобное для наблюдателя место.

Схемы таких насадок представлены на рис. 13.7. На рис. 13.7а показана насадка, в которой при повороте окулярной трубки на угол α необходимо вращать зеркало 1 на угол $\alpha/2$. В другой насадке (рис. 13.7б) относительно призмы 1 поворачивается вся призматическая система насадки с

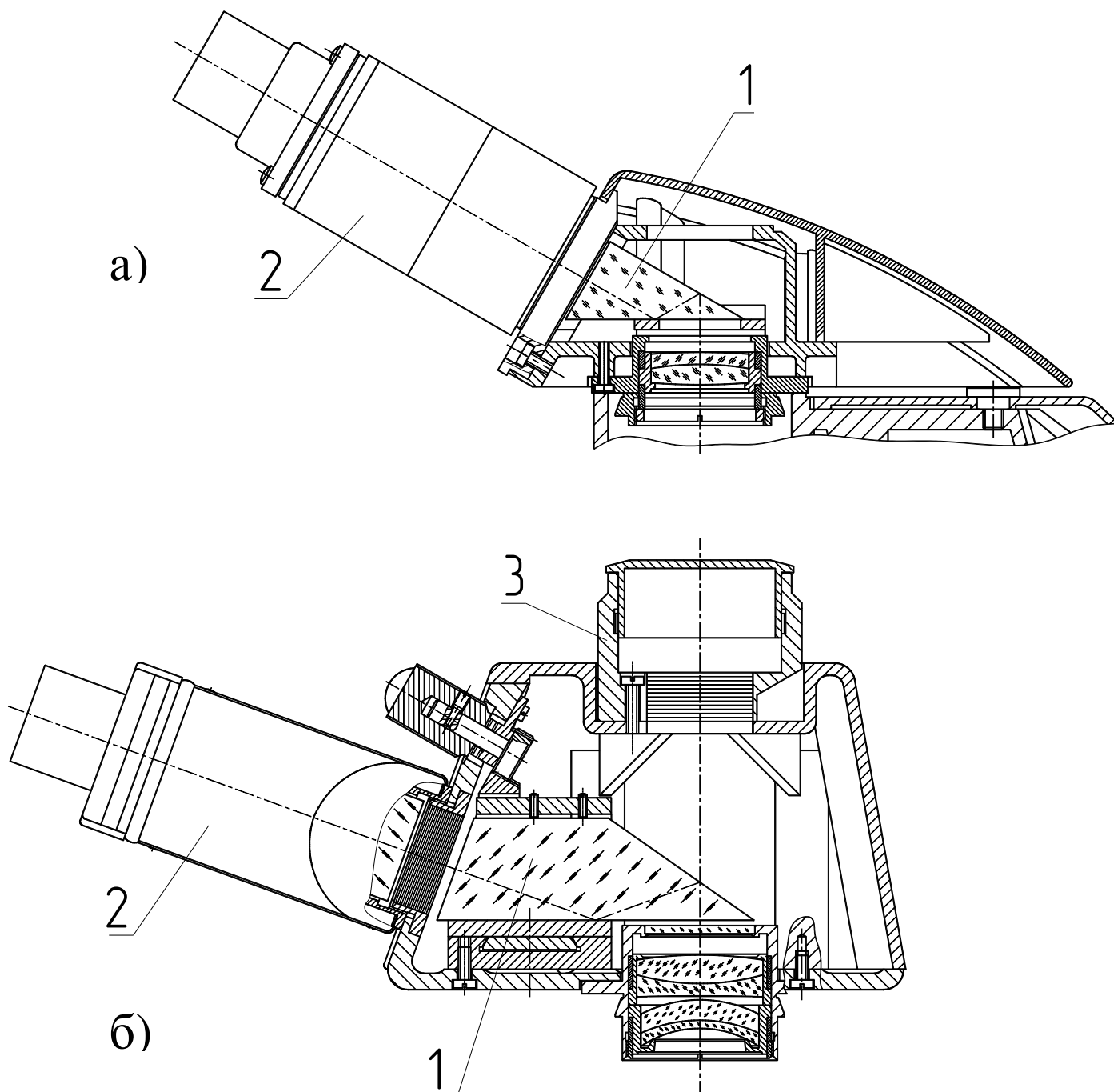
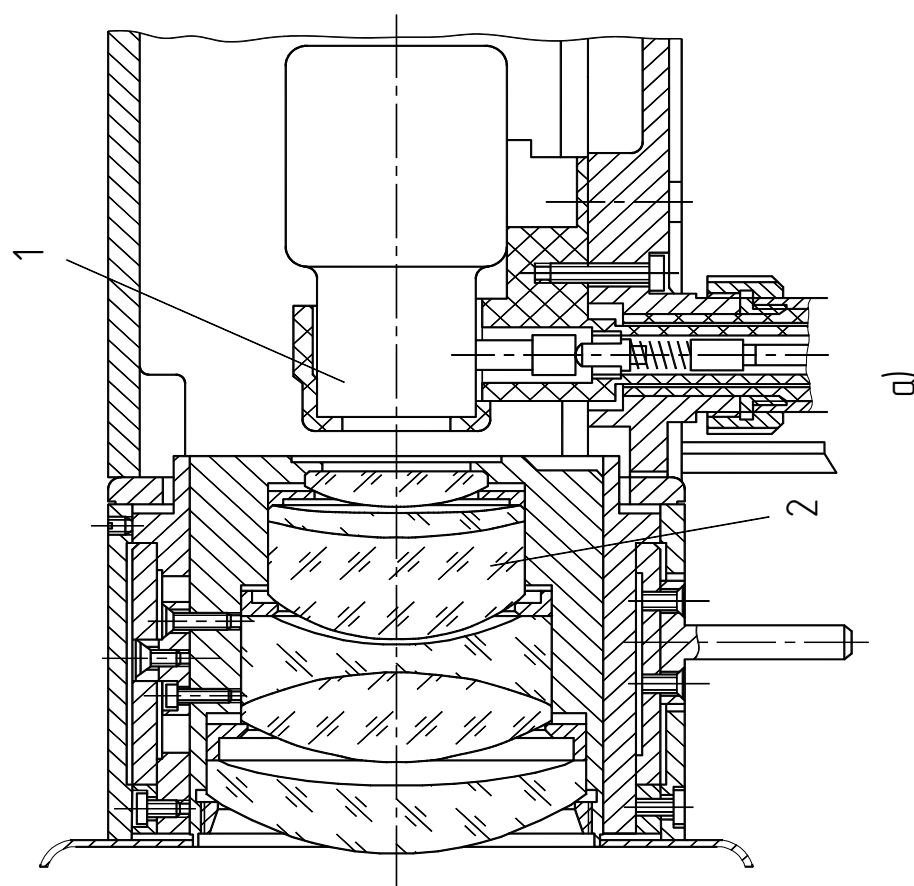


Рис. 13.5. Бинокулярная и тринокулярная насадки

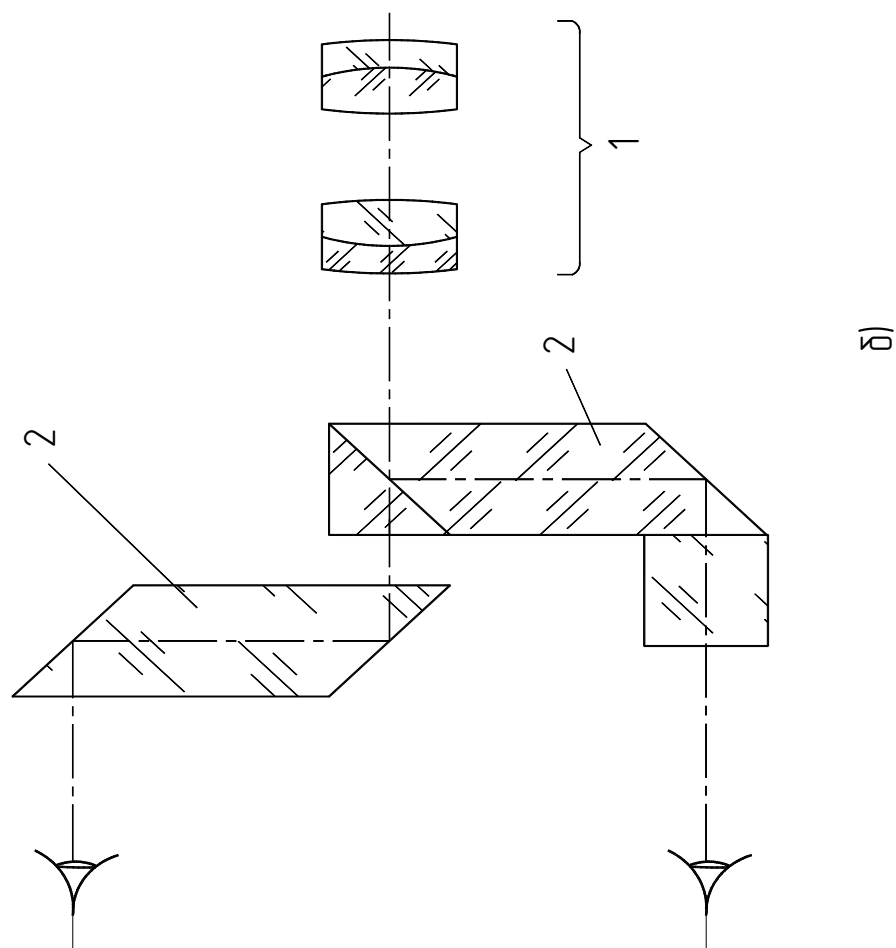
окулярами. В насадке (схема 13.7в) зеркало 1 вращается на угол в два раза меньший, чем угол вращения окуляра.

Типовая конструкция бинокля показана на рис. 13.8а. Призмы – ромбы 1 и 2 установлены в корпусах 3 и 4, вращающихся на оси 5. На корпусах 3 и 4 закреплены окулярные трубки 6 и 7. Винтами 8 регулируется момент трогания корпусов.

При исследовании на микроскопах объектов в поляризованном свете, измерениях и т.п. положение базовой плоскости должно оставаться неизменным, поскольку относительно этой плоскости производятся



а)



б)

Рис. 13.6. Бинокулярное наблюдение одной линзовой системой

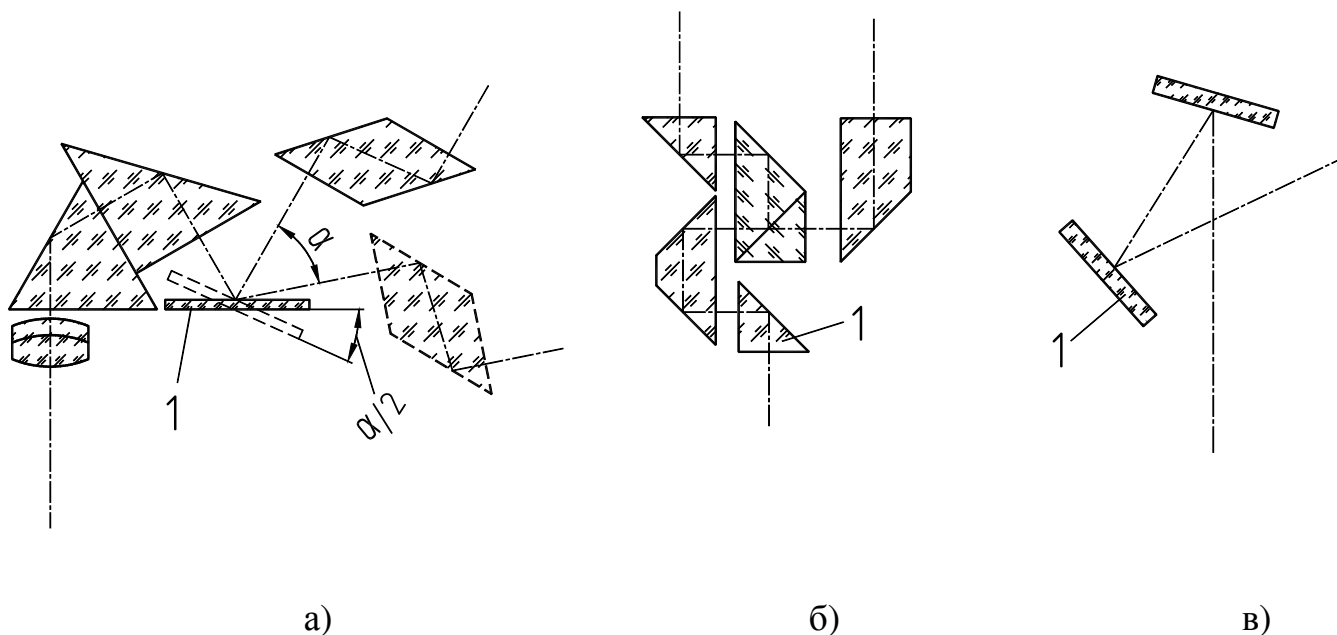


Рис. 13.7. Схемы насадок с регулируемой высотой окуляров

измерения. Поэтому вертикальный штрих перекрестия, установленного в окуляре, при измерении расстояния между окулярными трубками должен оставаться вертикальным. В насадке, имеющей поступательное перемещение окулярных трубок (см. рис. 13.3б), это требование легко обеспечивается, но при вращении окулярных трубок (см. рис. 13.3а и 13.8а) перекрестие также поворачивается. Поэтому в биноклях, используемых на поляризационных микроскопах, устанавливают различные механизмы, компенсирующие поворот окулярных трубок при изменении расстояния между глазами. На рис. 13.8б в сечении А – А представлена конструкция четырёхзвенного шарнира $O - O_1 - O_2 - O_3$, обеспечивающего постоянное положение вертикального штриха перекрестия. Точки O и O_3 шарнира совпадают с осями вращения центральной оси 1 и окулярных трубок 2. Оси O_1 и O_2 установлены на выступах втулок 3 и стоек 4. Оси O_1 и O_2 связаны коромыслами 5. Втулки 3 закреплены на окулярных трубках 2 и при изменении расстояния между глазами получают дополнительный поворот, который и компенсирует изменение угла между окулярными трубками. Пазы 6 в окулярных трубках 2 определяют постоянное положение съёмных окуляров с перекрестием или иной шкалой. Часто в биноклях ограничиваются установкой компенсирующего механизма, действующего только на одну окулярную трубку.

Имеются и другие разновидности насадок для стереоскопических и операционных микроскопов и т.д. Ознакомиться с ними можно в технической литературе.

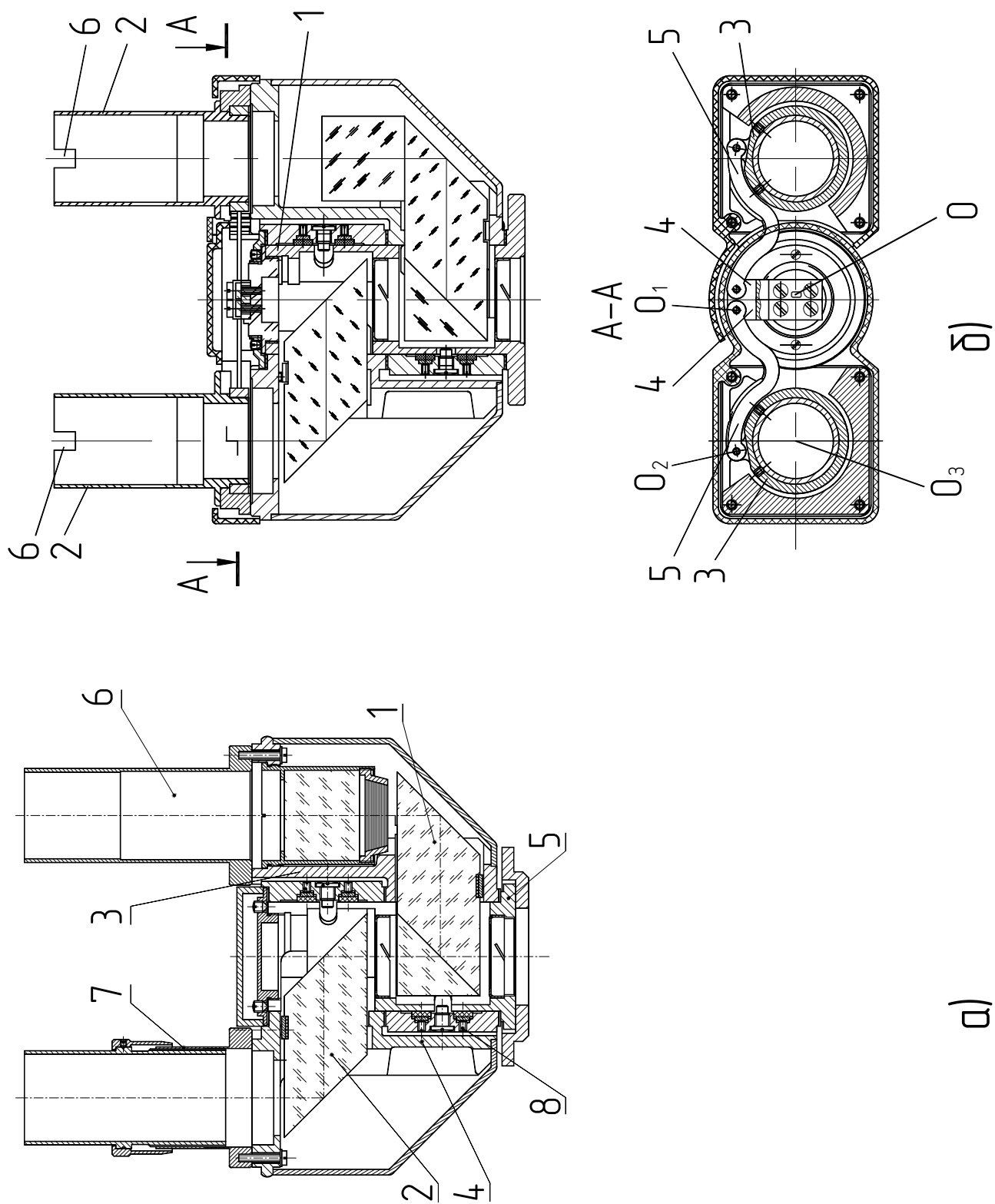


Рис. 13.8. Бинокуляры

Заключение

В настоящем пособии (части I и II) рассмотрен широкий круг вопросов системного проектирования ОП. Изложенный материал позволяет сделать вывод, что основными составными разделами такого проектирования являются:

- методика целеполагания, поиск и оценка технических задач; определение потребительских свойств ОП и стратегической потребности в них; анализ рынка потребления;
- эвристическое проектирование; научно – техническое прогнозирование развития ОП; поиск новых вариантов принципов действия, схем, конструкций и других СЧ;
- разработка общей теории проектирования, основанной на анализе и оптимизации методов проектирования, выявлении основных показателей проектирования;
- общие вопросы проектирования ОП; исследование общетехнических вопросов, определяющих принципы действия, схемы и конструкции ОП и их СЧ;
- частные теории проектирования отдельных приборов и их СЧ.

При реальном проектировании конструктор имеет дело практически со всеми указанными разделами. Поэтому глубокое понимание и умение применять их на практике являются неотъемлемой частью работы конструктора.

К сожалению, не все перечисленные вопросы получили в пособии достаточное отражение. Это связано в основном с двумя причинами – отсутствием в настоящее время достаточной разработки этих вопросов и ограниченным объёмом пособия.

Частично эти недостатки можно ликвидировать, используя литературу, указанную в I и II частях пособия.

Список литературы

К главе 1

1. Врагов Ю. Д. Анализ компоновок металлорежущих станков (Основы компонетики). – М.: Машиностроение, 1978.
2. Сомов Ю. С. Композиция в технике. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1987.
3. Русинов М. М. Композиция оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1989.

К главе 2

1. Решетов Д. Н., Каминская В. В., Лapidус А.С. и др. Детали и механизмы металлорежущих станков. Т. 1, 2. – М.: Машиностроение, 1972.
2. Михельсон Н.Н. Оптические телескопы. Теория и конструкция. – М.: Наука, 1976.
3. Рагузин Р.М. Несущие конструкции оптических приборов. Учебное пособие. ЛИТМО. 1989.

К главе 3

1. Решетов Л. Н. Самоустанавливающие механизмы. (Справочник). – М.: Машиностроение, 1991.
2. Кулагин В. В. Основы конструирования оптических приборов. – Л.: Машиностроение. 1982.
3. Латыев С. М. Конструирование точных оптических приборов. Учебное пособие. ЛИТМО, 1996.
4. Долинский И. М. Структурный анализ конструкций подвижных систем оптических приборов. Учебное пособие. ЛИТМО, 1980.

К главам 4, 5

1. Литвин Ф.Л. Проектирование механизмов и деталей приборов. – Л.: Машиностроение, 1973.
2. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Под ред. В.А. Панова. Л.: Машиностроение, 1980.
3. Шульман М. Я. Автоматическая фокусировка оптических систем. Л.: Машиностроение, 1990.
4. Рагузин Р. М. Фокусировочные механизмы оптических приборов. Ч. 1, 2. Учебное пособие. ИТМО, 1997.

К главам 6, 7

1. Ключникова Л. В., Ключников В. В. Проектирование оптико-механических приборов. Учебное пособие. СПб.: Политехника, 1994.
2. Рагузин Р. М., Маламед Е. Р. Функциональные узлы приборов. Учебное пособие. ЛИТМО, 1985.

К главам 8, 9

1. Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1982.
2. Данилевич Ф.М., Никитин В.А., Смирнова П.Е. Сборка и юстировка оптических контрольно-измерительных приборов. Л.: Машиностроение, 1976.
3. Проектирование спектральной аппаратуры. Под ред. К. И. Тарасова. – Л.: Машиностроение, 1980.
4. Бурбаев А.М. Отработка технологичности конструкций оптических приборов. ИТМО, 2004.

К главе 10

1. Парвалюсов Ю. Б. и др. Проектирование оптико-электронных приборов. Под ред. Ю. Г. Якушенкова. – М.: Машиностроение, 1990.

К главам 11, 12, 13

1. Левин И.Я. Справочник конструктора точных приборов М.: Машиностроение, 1967.
2. Справочник. Уваров Б.М., Бойко А.В. и др. Детали и механизмы приборов. Киев. Техника, 1987.
3. Плотников В. С., Варфоломеев Д. И., Пустовалов В. Е. Расчет и конструирование оптико-механических приборов. М.: Машиностроение, 1983.

К заключению

1. Краузе В. Конструирование приборов. Т. 1, 2. М.: Машиностроение, 1987.
2. Орлов И. И. Основы конструирования. Справочно- методическое пособие. Т.1, 2 – М.: Машиностроение. 1987.
3. Маламед Е.Р. Конструирование оптических приборов космического базирования. ИТМО, 2002.

Рэм Михайлович Рагузин

**Принципы системного проектирования
оптических приборов**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Часть II

В авторской редакции
Компьютерный набор и верстка
Дизайн обложки

Р. М. Рагузин
В. А. Панов
А. О. Тетеревков

Редакционно-издательский отдел
Санкт-Петербургского государственного университета
информационных технологий, механики и оптики
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Подписано к печати

Отпечатано на ризографе

Тираж 150 экз.

Заказ №

Редакционно-издательский отдел
Санкт-Петербургского государственного
университета информационных
технологий, механики и оптики
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

