

# УПЛОТНЕНИЯ ОПОР

## Назначение уплотнений

разделение сред с различными физическими свойствами и параметрами.

Уплотнения применяют в подвижных и неподвижных соединениях конструкций. Условия их эксплуатации весьма разнообразны, поскольку трудно назвать область техники, в которой бы не возникала проблема герметизации. Часто именно уплотнения определяют качественные показатели машины. Неверный выбор уплотнений или их низкое качество могут привести к отклонениям показателей или катастрофам.

## Требования к уплотнениям

- Обеспечение заданной величины утечек (уплотнения всегда текут!!)
- Простота и надежность конструкции
- Минимальные габариты и вес

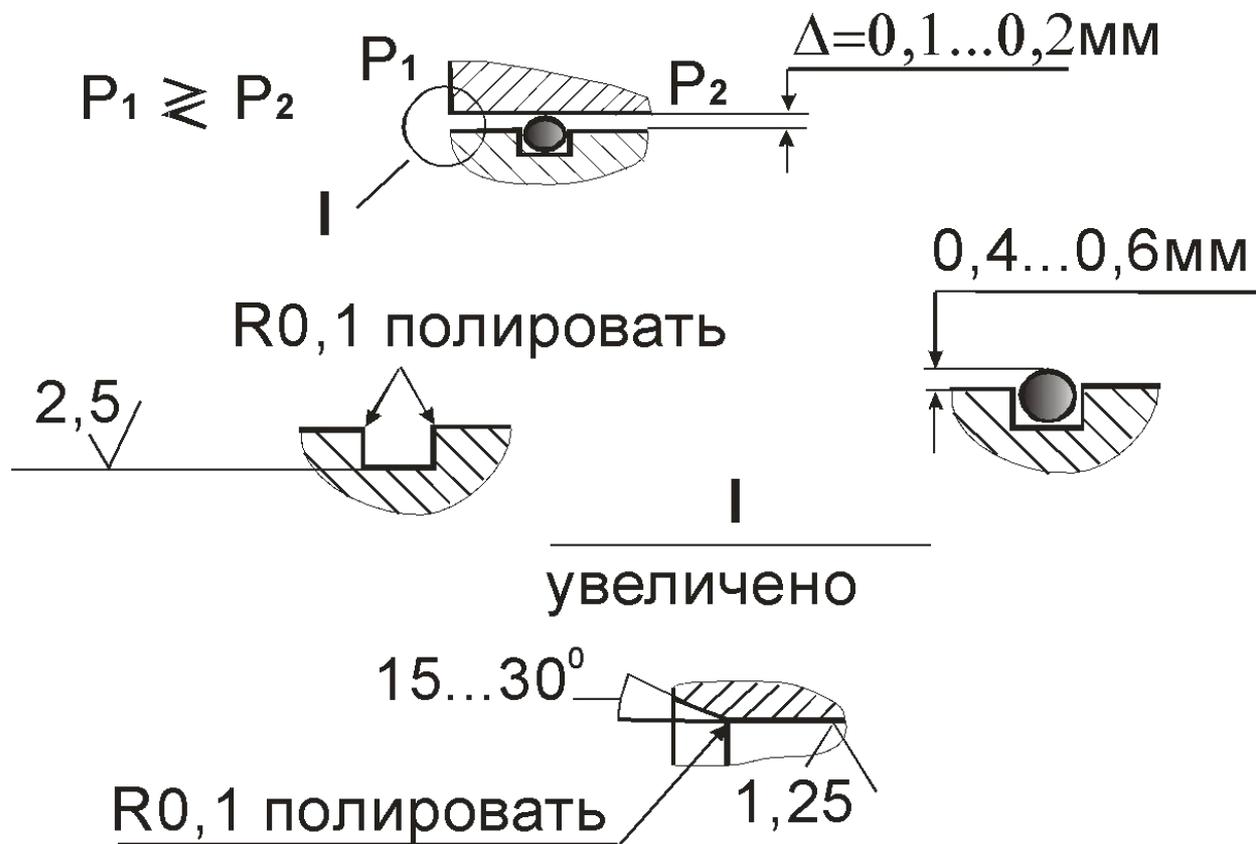
# ТИПЫ УПЛОТНЕНИЙ



# НЕПОДВИЖНЫЕ УПЛОТНЕНИЯ

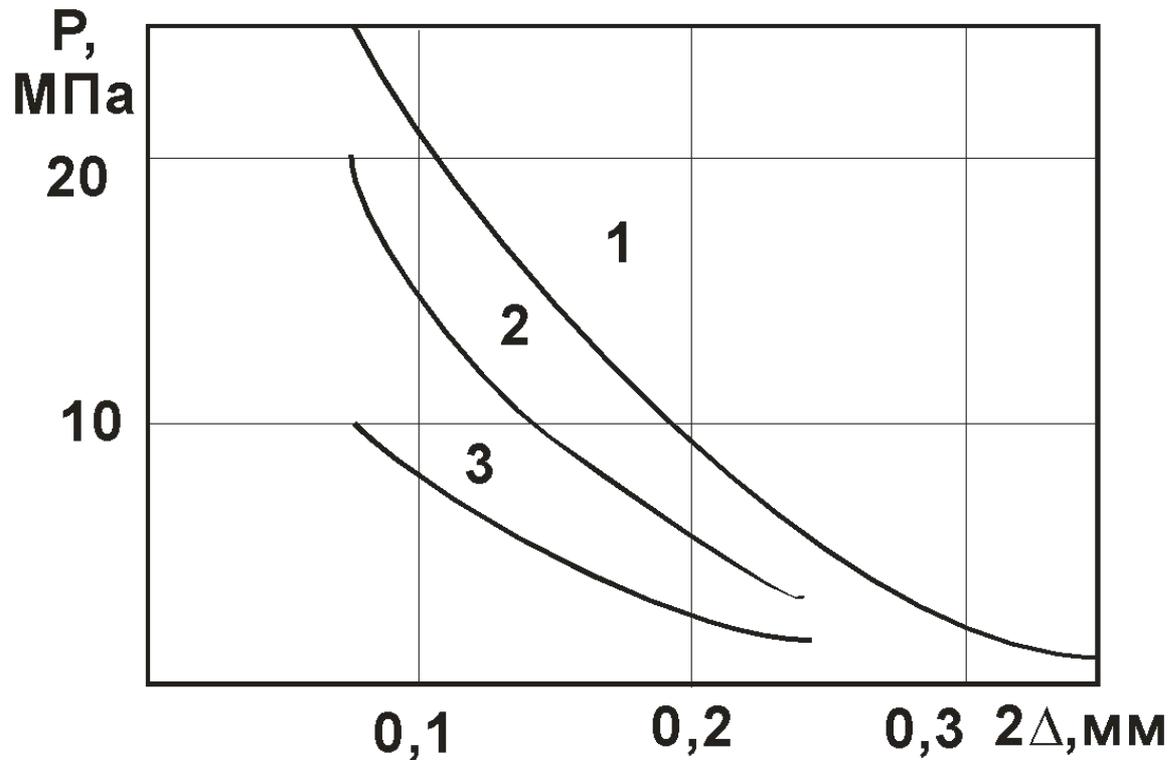
Область применения – стыки фланцев, крышки маслополостей, насосов и т.д.

## Радиальные уплотнения резиновыми кольцами (ГОСТ 9833-73)



Уплотнение работает до перепада давлений 20МПа

# ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗИНОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ



1 - твердость по Шору 90-95 2 - 80-85 3 - 60-75

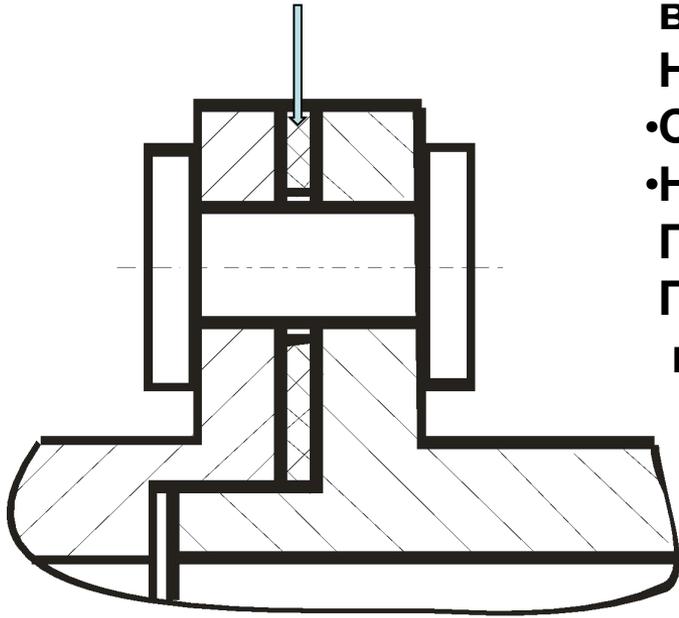
Диаметр кольца подбирается таким образом, чтобы при сборке был натяг 0,4...0,6мм (большой натяг в случае подвижных возвратно-поступательных движений).

Точная величина натяга и геометрии – согласно указанного ГОСТа.

По внутреннему диаметру допускается диаметр резинового кольца брать меньше диаметра канавки на 1...5%.

# ТОРЦЕВЫЕ УПЛОТНЕНИЯ

прокладка



Достоинства – простота (резину можно вырезать).

Недостатки

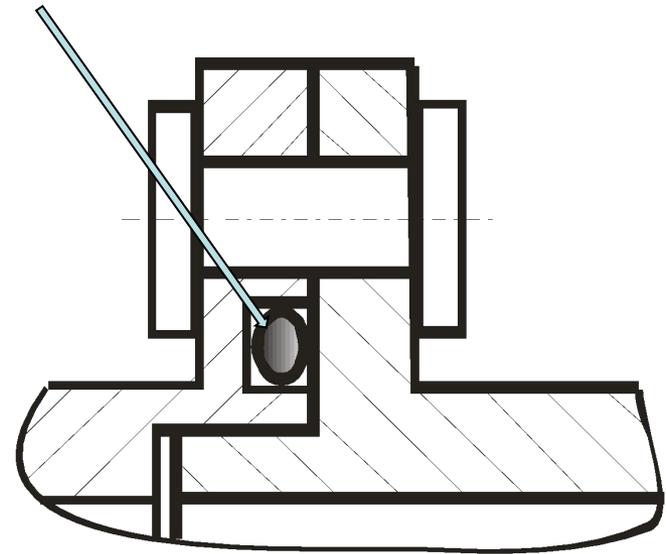
- Сложность обеспечения усилия затяжки
- Неопределенность осевого положения.

Применяется до давления 10Мпа.

При большем давлении прокладку может «выдуть».

Материал прокладки – резина или паронит

Резиновое кольцо



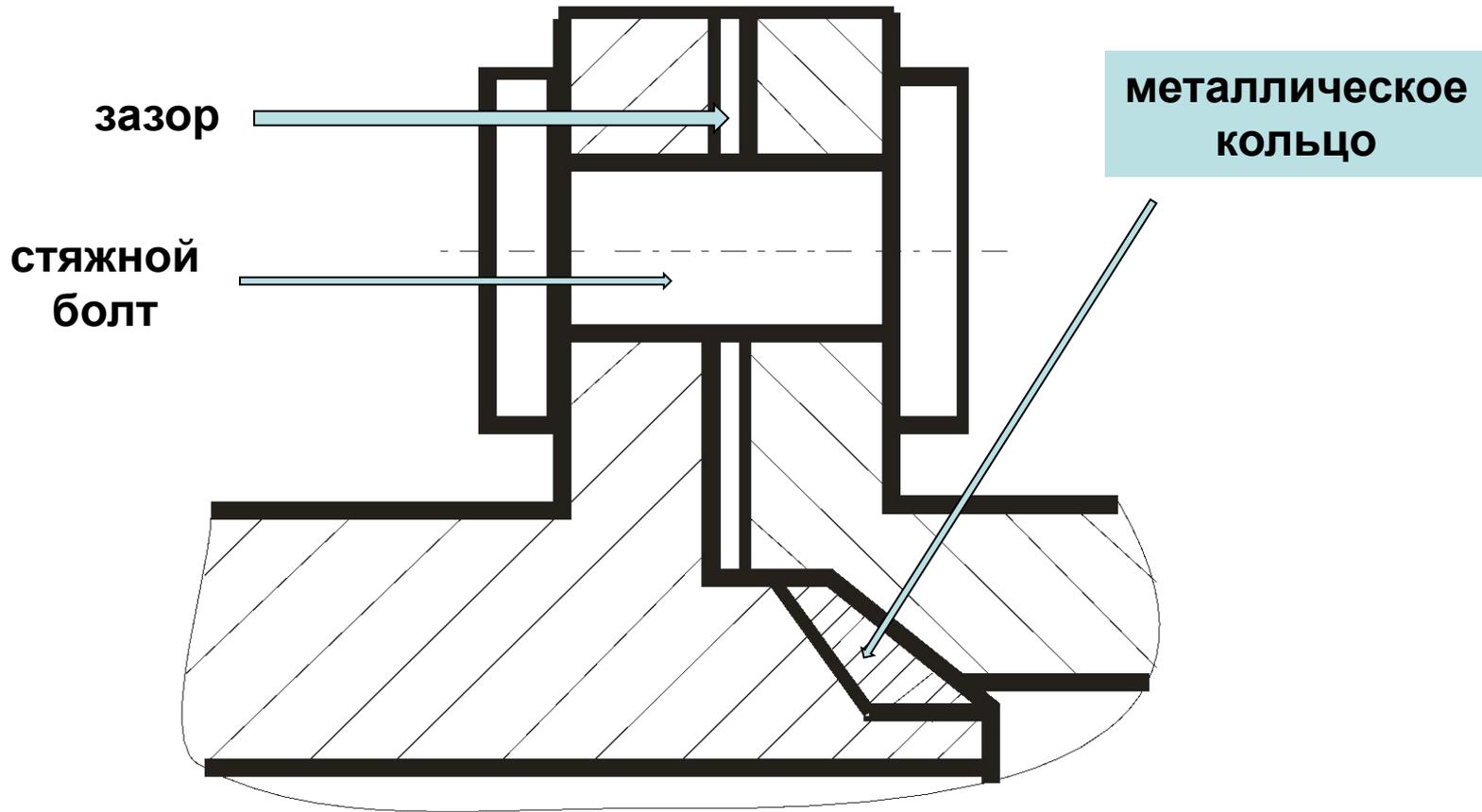
Достоинство - определенность осевого положения и усилия затяжки болтов.

Выдерживает большие давления (до 20Мпа).

Недостаток – кольца необходимо покупать.

Это готовое изделие.

# УПЛОТНЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ КОЛЬЦАМИ



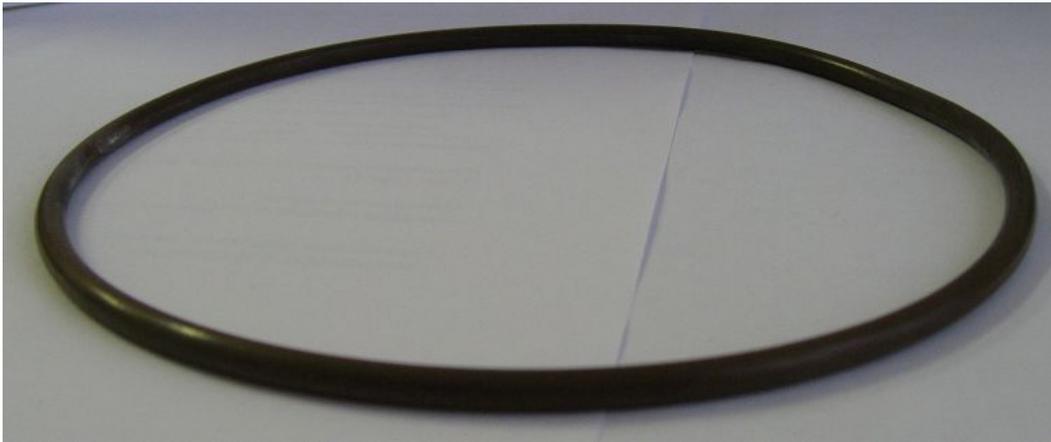
Выполняется из материала более мягкого, чем корпус (алюминий, латунь, медь). Применяется при высоких давлениях и агрессивных средах или криогенных компонентах, преимущественно в ТНА ЖРД.

# ПОДВИЖНЫЕ УПЛОТНЕНИЯ

## Возвратно-поступательное движение

Такое движение реализуется в гидроцилиндрах систем регулирования сопел и управления реверсом тяги.

В уплотнениях возвратно-поступательного движения используются резиновые кольца и металлические разрезные упругие кольца типа поршневых. О резиновых кольцах говорилось в предыдущем разделе, о поршневых кольцах будет сказано далее



# БЕСКОНТАКТНЫЕ УПЛОТНЕНИЯ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

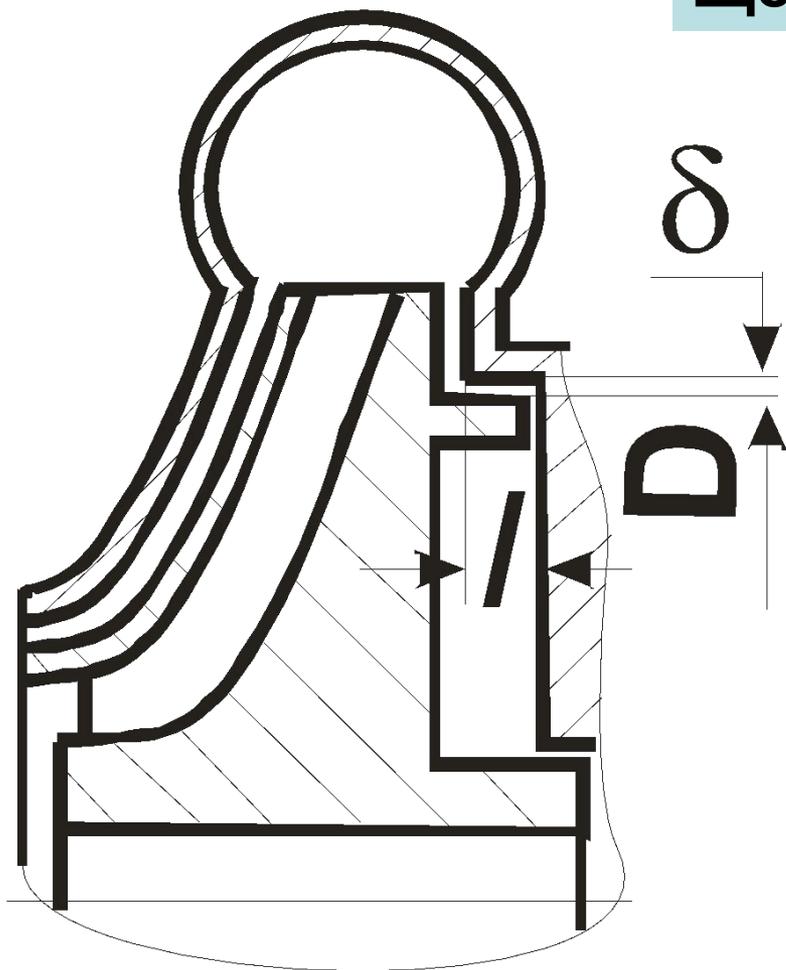
## Преимущества бесконтактных уплотнений

- Простота конструкции
- Отсутствие износа

## Недостатки

- Большие утечки
- Ухудшение работы с ростом высоты полета

## Щелевые

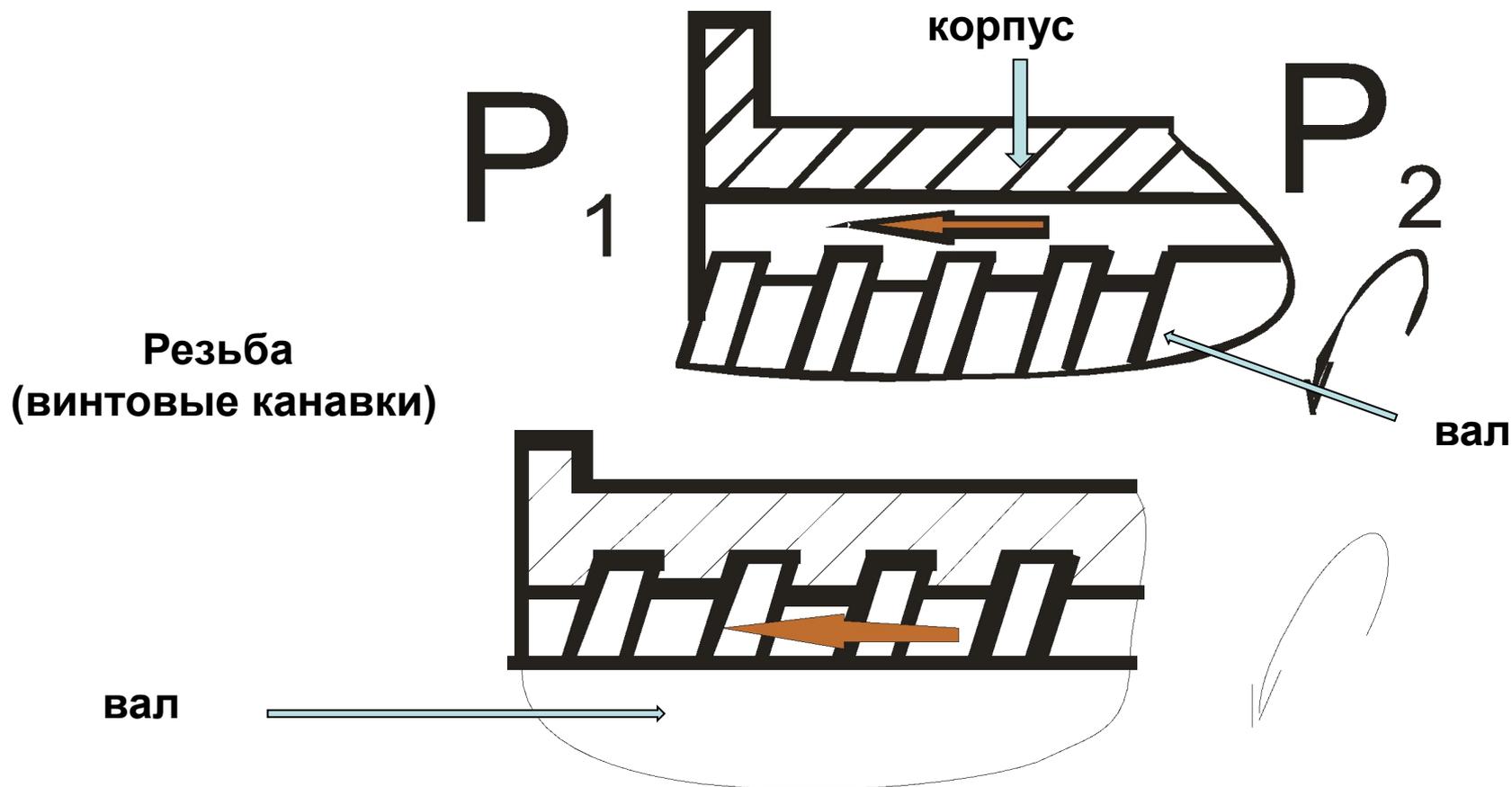


Применяются в случае жидкостных рабочих сред – в основном в ТНА ЖРД. Утечки через уплотнение определяются по формуле

$$Q = \frac{\pi D \delta_0^3}{12 \mu l}$$

Поскольку вязкость воздуха на несколько порядков меньше, чем вязкость жидкости, то утечки через такое уплотнение будут слишком велики и в ГТД такие уплотнения используются редко (ГТД-350).

# ВИНТОКАНАВОЧНЫЕ УПЛОТНЕНИЯ



Резьба  
(винтовые канавки)

вал

При этом на валу или корпусе выполняется многозаходная резьба

направление которой выбирается таким образом, чтобы при данном направлении вращения вала оно препятствовало вытеканию масла из полости опоры.

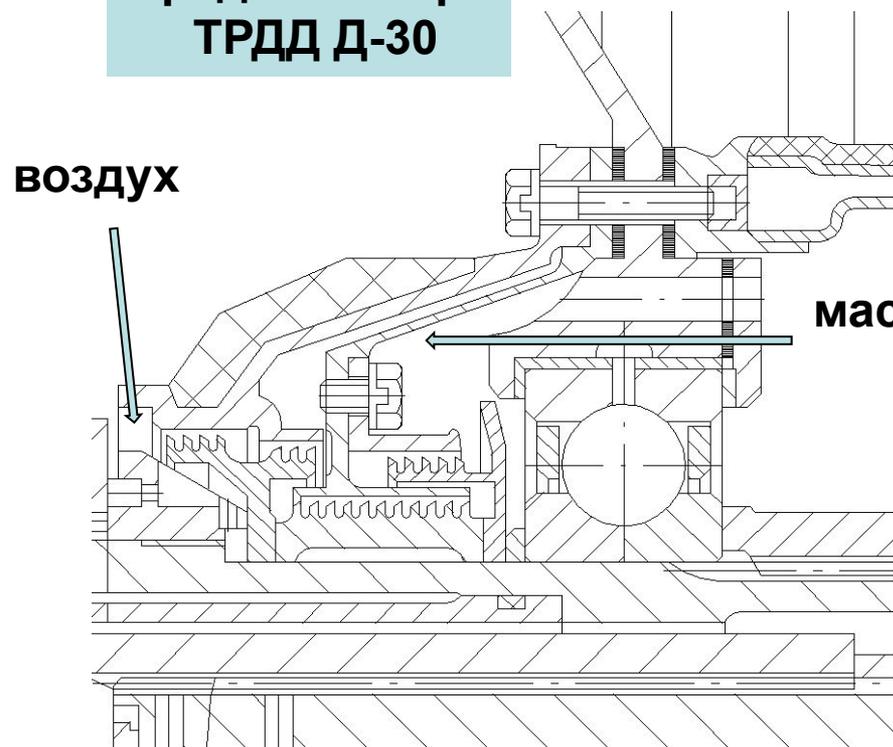
Радиальный зазор между вершинами резьбы и валом принимается в пределах 0,1 – 0,2 мм. Пример – ВК-1

# ЛАБИРИНТНЫЕ УПЛОТНЕНИЯ

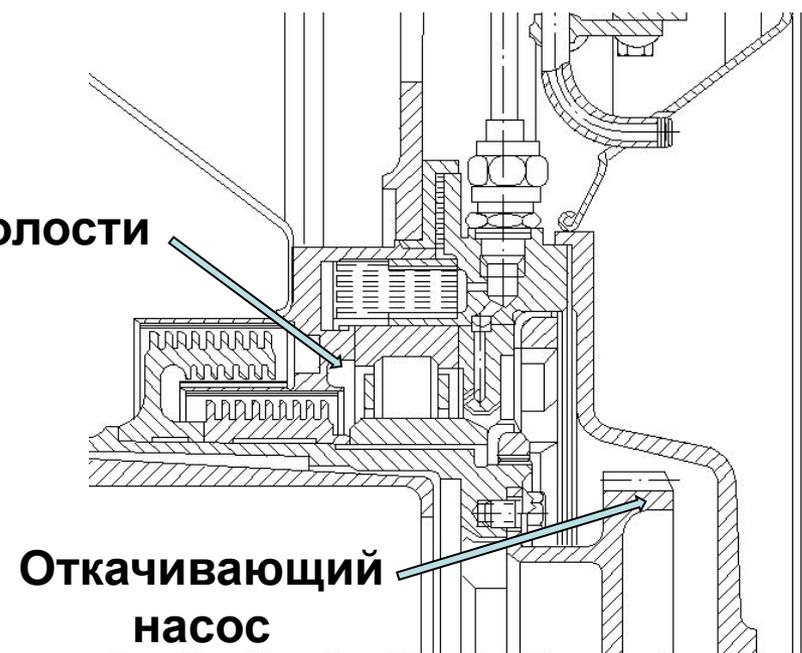
Принцип работы давался в разделе «компрессор».

Но эти уплотнения применяются также и в опорах. Однако при этом необходим наддув полости опор с целью устранения проникновения масла в газоздушный тракт. Для опор КНД и турбин необходимо организовывать подвод воздуха в специально предусмотренные предмасляные полости. Иногда для устранения утечек масла создают небольшое разрежение в опоре (задняя опора турбины НК-12).

Средняя опора  
ТРДД Д-30

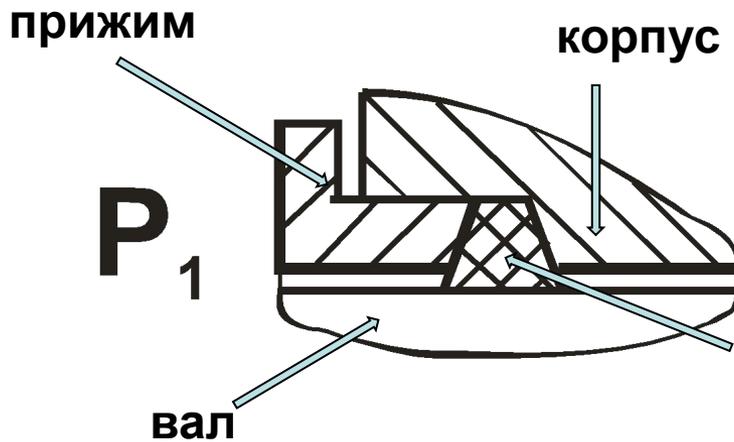


Задняя опора турбины ТВД НК-12



# КОНТАКТНЫЕ УПЛОТНЕНИЯ

## Сальниковые уплотнения



Наиболее простыми по конструкции являются сальниковые уплотнения.

уплотнитель (фетр, набивка)

$$P_1 \approx P_2$$

Контактное давление на поверхности создается за счет упругости материала

сальника. Является уплотнением двустороннего типа

$$P_1 \approx P_2$$

Пределы применимости  $\Delta P < 0,5 \text{ Мпа}$ . Важным параметром является

допустимая скорость скольжения  $U$ , т.к. она определяет выделяемое при трении тепло. Для сальников  $U < 20 \text{ м/с}$ .

$$U < 20 \text{ м/с}$$

В ГТД используется только в агрегатах системы управления.

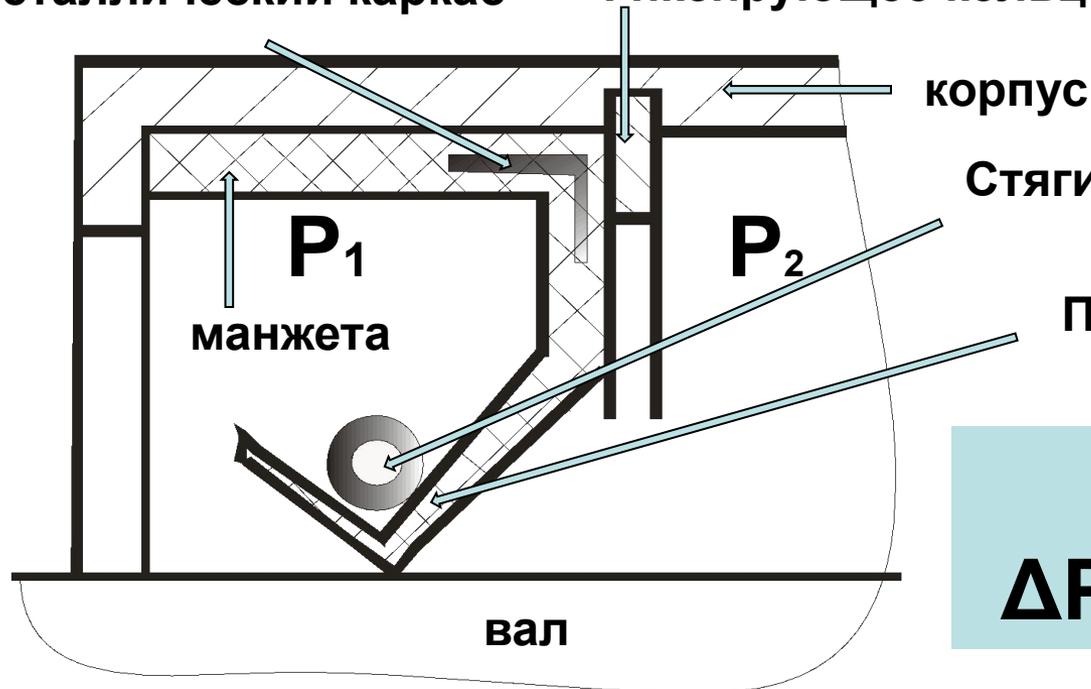
Рабочие поверхности под сальник полируются

# МАНЖЕТНЫЕ УПЛОТНЕНИЯ

Металлический каркас

Фиксирующее кольцо

$$P_1 > P_2$$



корпус

Стягивающая (браслетная) пружина  
стояночного уплотнения

Податливая перемычка

Возможности

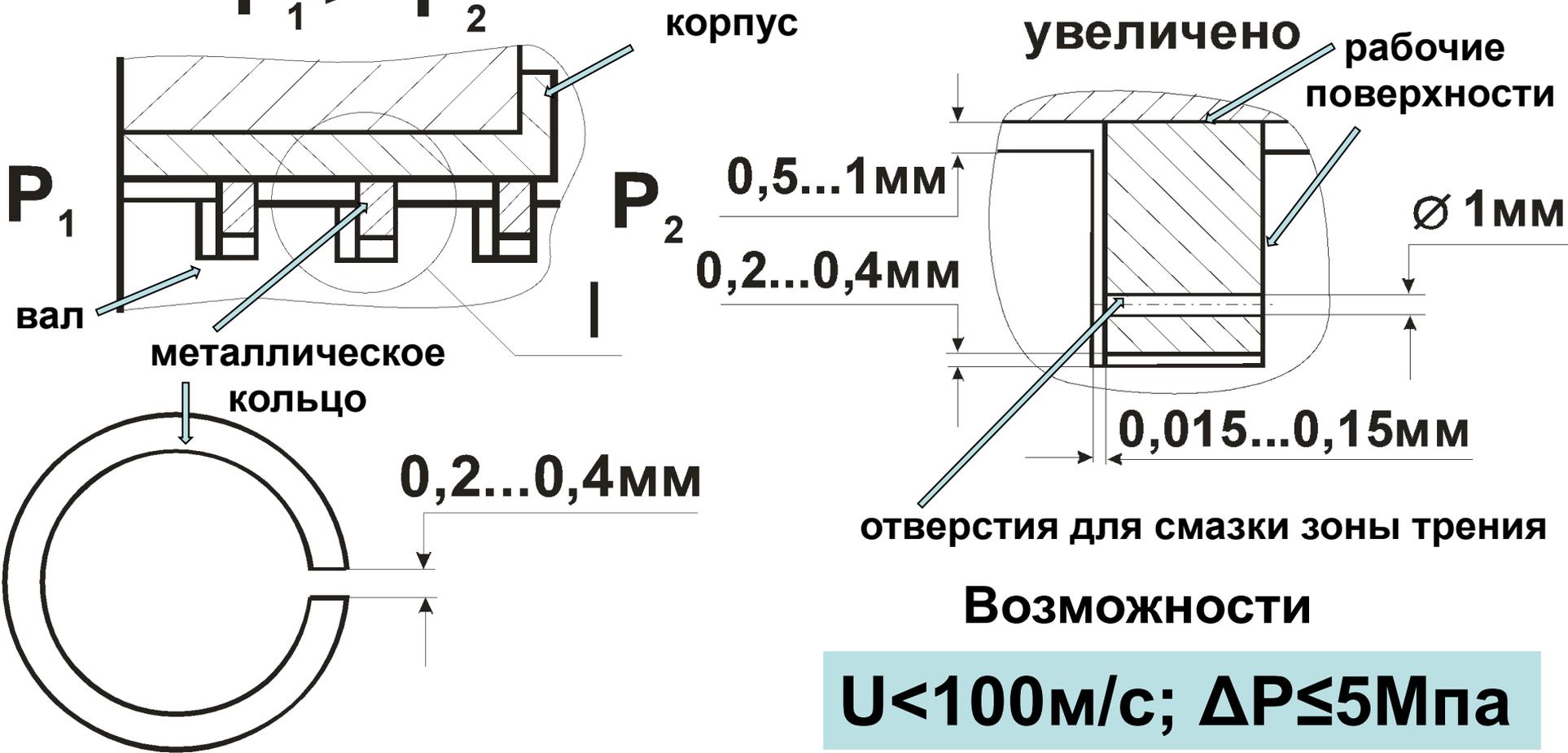
$$U < 40 \text{ м/с};$$
$$\Delta P \leq 0,5 \text{ МПа (5 атм)}$$

вал

Для придания манжете жесткости в нее обычно вставляется металлический каркас, который обеспечивает плотную посадку манжеты по цилиндрической и торцовым поверхностям. Тело манжеты соединяется с уплотнительной частью тонкой податливой перемычкой. Как правило, для обеспечения необходимого давления на контактную поверхность устанавливается браслетная пружина. Это уплотнение одностороннего действия и уплотнение осуществляется не только за счет действия эластичного элемента, но и за счет действия рабочего перепада давления, вследствие оно и является уплотнением одностороннего действия.

# УПЛОТНЕНИЯ УПРУГИМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ КОЛЬЦАМИ

$$P_1 > P_2$$

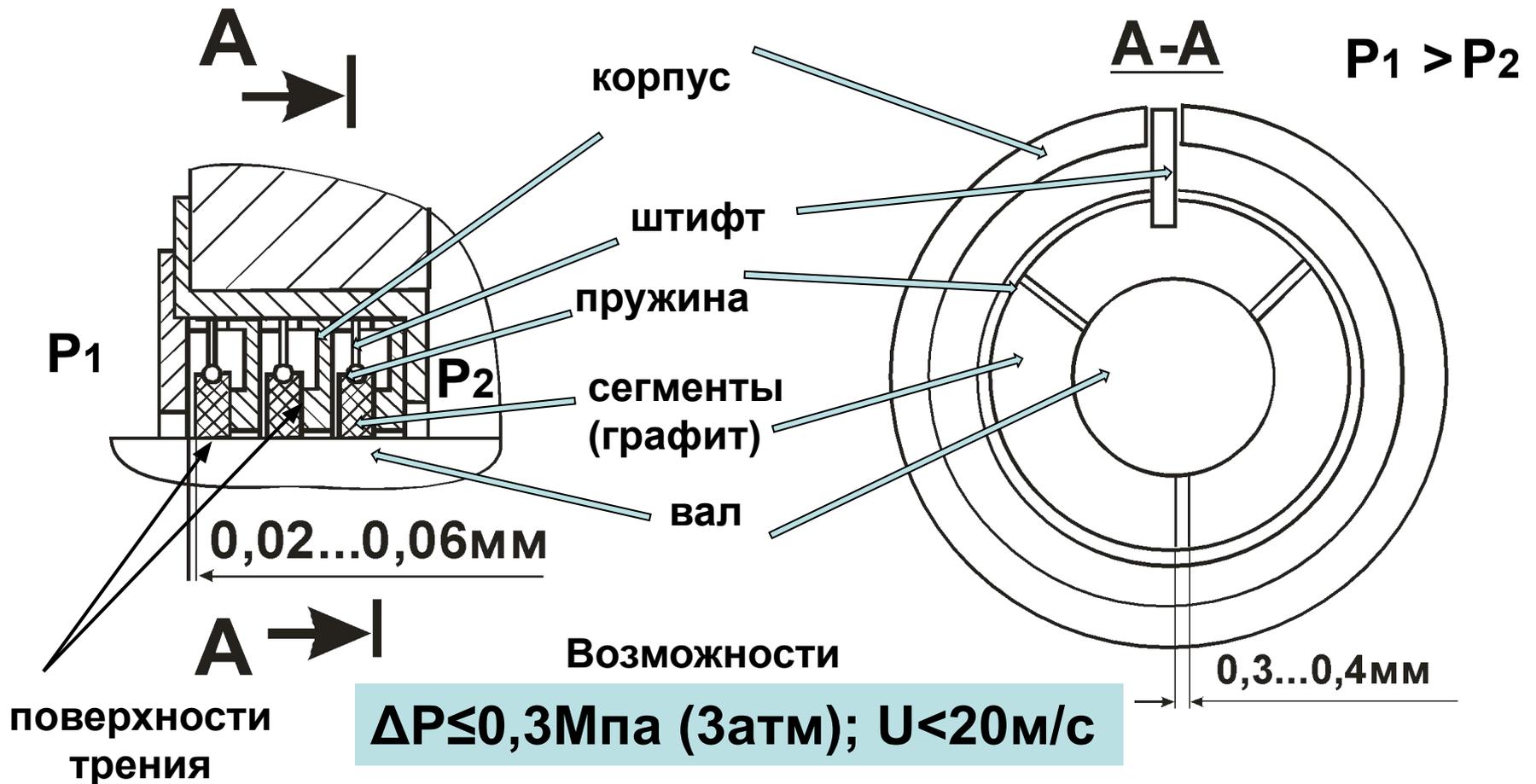


**Возможности**

**$U < 100\text{ м/с}$ ;  $\Delta P \leq 5\text{ Мпа}$**

Изготавливаются кольца из бронзы или чугуна.

# СЕГМЕНТНЫЕ УПЛОТНЕНИЯ



Применяют уплотнения с разрезанными на три части сегментными кольцами из графита. Сегменты располагаются в гнезде корпуса с осевым зазором 0,02...0,06 мм и прижимаются к поверхности вала браслетной пружиной, а от проворота фиксируются штифтом. Кольцевые сегменты изготавливаются из графита или графитизированного чугуна с обязательной приработкой по уплотняемой поверхности.

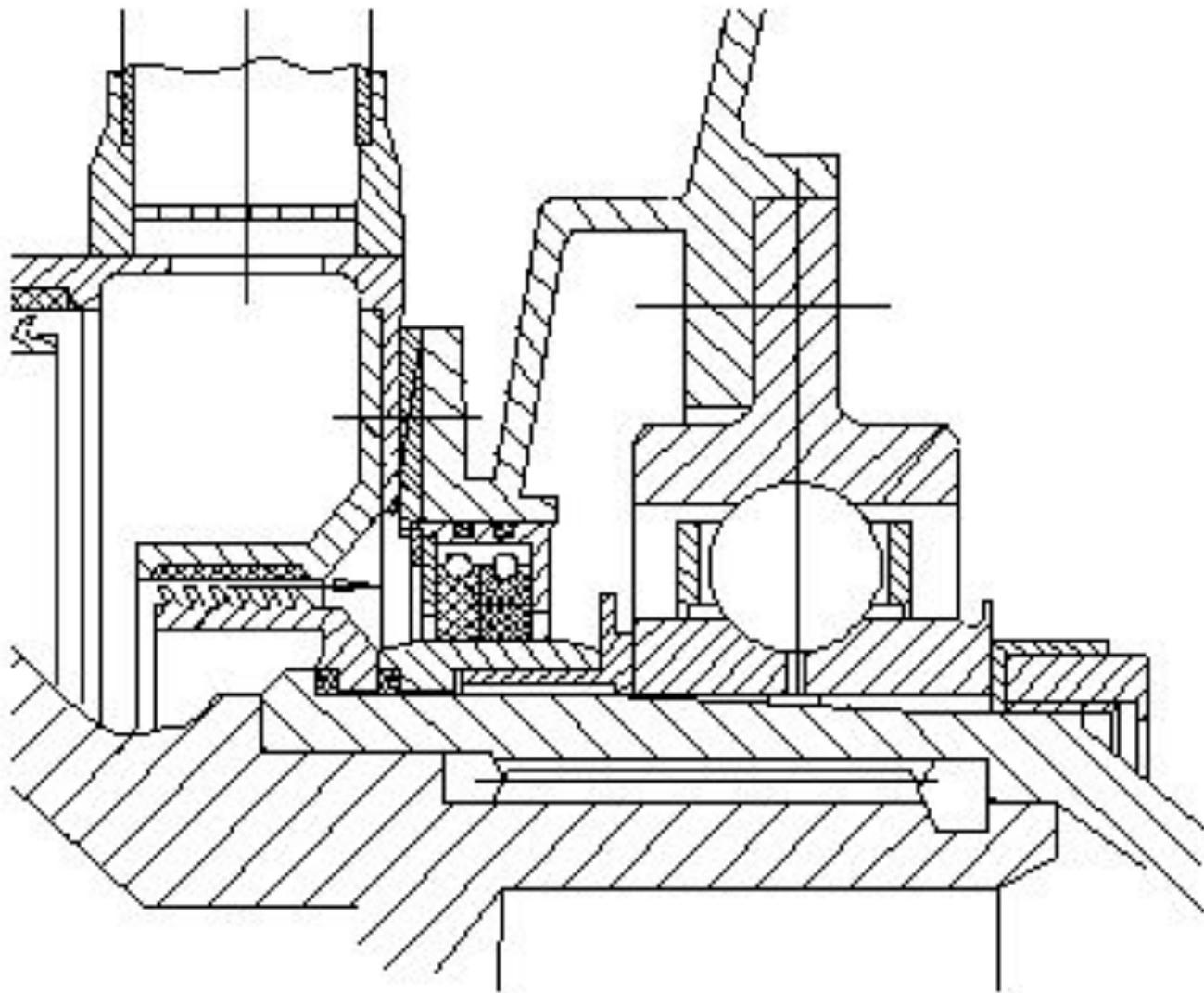
# **РАБОТА СЕГМЕНТНОГО УПЛОТНЕНИЯ**

**Применяют уплотнения с разрезанными на три части сегментными кольцами из графита. Сегменты располагаются в гнезде корпуса с осевым зазором 0,02...0,06мм и прижимаются к поверхности вала браслетной пружиной, а от проворота фиксируются штифтом.**

**Кольцевые сегменты притираются к валу и прижимаются давлением из уплотняемой полости своими боковыми поверхностями к стенкам таким образом, что создают герметизацию одновременно по цилиндрической и торцевой поверхностям.**

**Для повышения герметичности узел такого уплотнения может иметь два или три последовательно установленных кольца из сегментов. При этом их фиксируют относительно корпуса так, чтобы торцевые зазоры между сегментами отдельных колец смещались относительно друг друга. По мере износа сегментов торцовый зазор между ними уменьшается при неизменном контакте по поверхности вала.**

# КОНСТРУКЦИЯ СЕГМЕНТНОГО УПЛОТНЕНИЯ ТРДД АЛ-31Ф



# ТОРЦЕВЫЕ КОНТАКТНЫЕ УПЛОТНЕНИЯ

Невращающееся кольцо (но аксиально подвижное) и вращающееся кольцо 2 (контртело) образуют пару трения. Контактное давление на поверхности скольжения

в паре трения создается как давлением окружающей среды, так и пружинами 3, которые служат также для создания постоянного усилия с целью компенсации износа.

Для предотвращения перетекания жидкости устанавливается вторичное уплотнение 4.

В контактном уплотнении можно выделить 3 элемента:

- **Упругий элемент.**

Он создает контактное давление на поверхности трения.

- **Пара трения.**

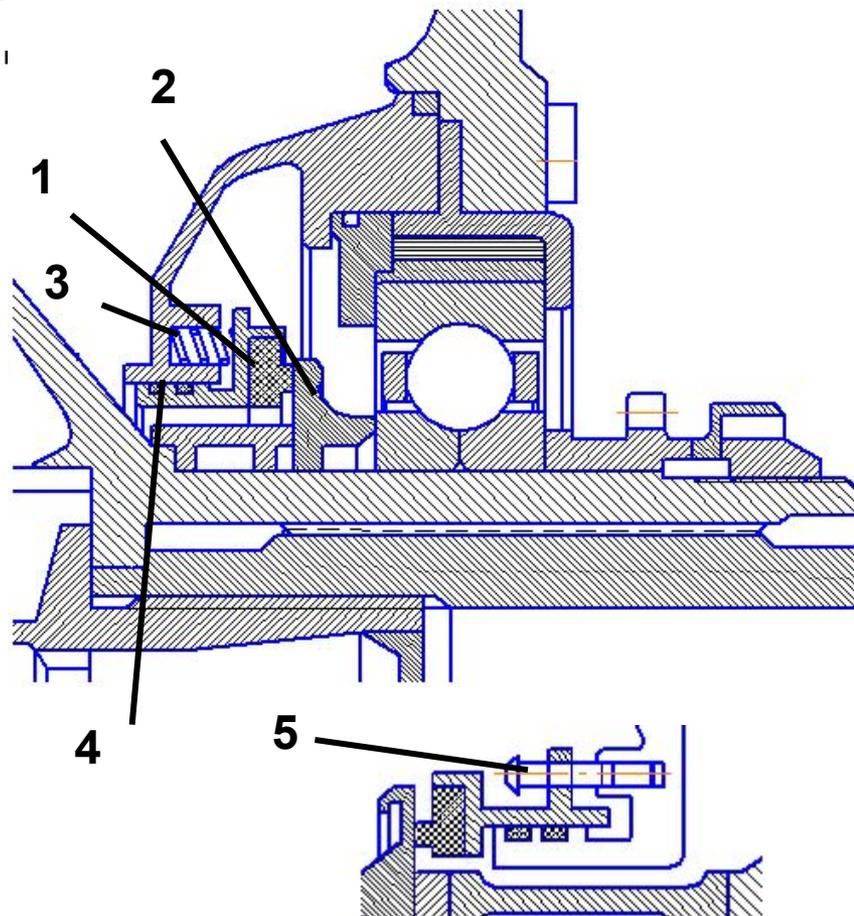
Она и осуществляет уплотнение вращательного движения.

- **Вторичное уплотнения**

(уплотнение возвратно-поступательного движения).

В данной схеме упругий элемент – это пружина 3 и давление окружающей среды.

Могут быть конструкции, где в качестве упругого элемента используется только давление воздуха (Д-36, АИ-25).



# МАТЕРИАЛЫ ПАР ТРЕНИЯ

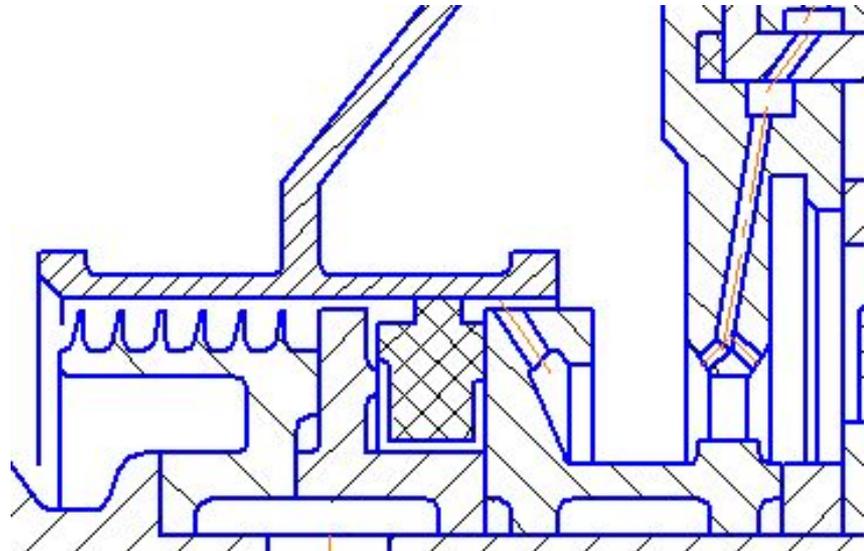
Невращающееся кольцо – графиты различных марок (АТГ, пирографит, нигран-В, силицированный графит.) Графит применяется из-за его хороших антифрикционных свойств, высокой твердости и теплопроводности. Пирографит – твердый, но очень дорогой материал. Выдерживает температуру воздуха до 350...4000С.

Нигран В – более дешевый, но и менее твердый, имеет меньший ресурс работы. Температура воздуха – до 3000С.

Вращающееся кольцо – сталь с высоким коэффициентом теплопроводности типа 38ХМЮА с азотированной контактирующей поверхностью.

Применяются также металлокерамические сплавы (карбиды вольфрама и кремния, молибден – титан). Такие материалы получают спеканием из порошков при высоких давлениях и температуре.

Для улучшения условий работы пары трения поверхность скольжения обычно смазывают



# ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

## ПАРЫ ТРЕНИЯ

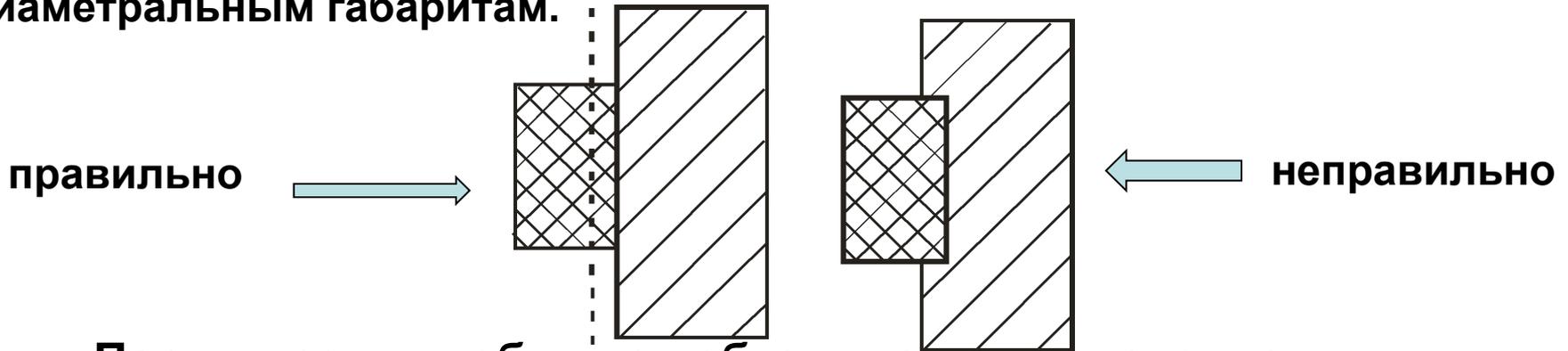
Очень жесткие требования предъявляются к неплоскостности поверхностей

пары трения – не более 1мкм. Обеспечивается притиркой, желательно на специальных станках. Сейчас производится в основном вручную.

Неплоскостность контролируют интерференционным методом с помощью

специальных стекол. Более точный метод – на специальных измерительных

станках с датчиками и компьютерной обработкой сигнала. При проектировании уплотнений нужно обращать внимание на геометрию колец – кольцо пониженной твердости должно быть меньше по диаметральным габаритам.



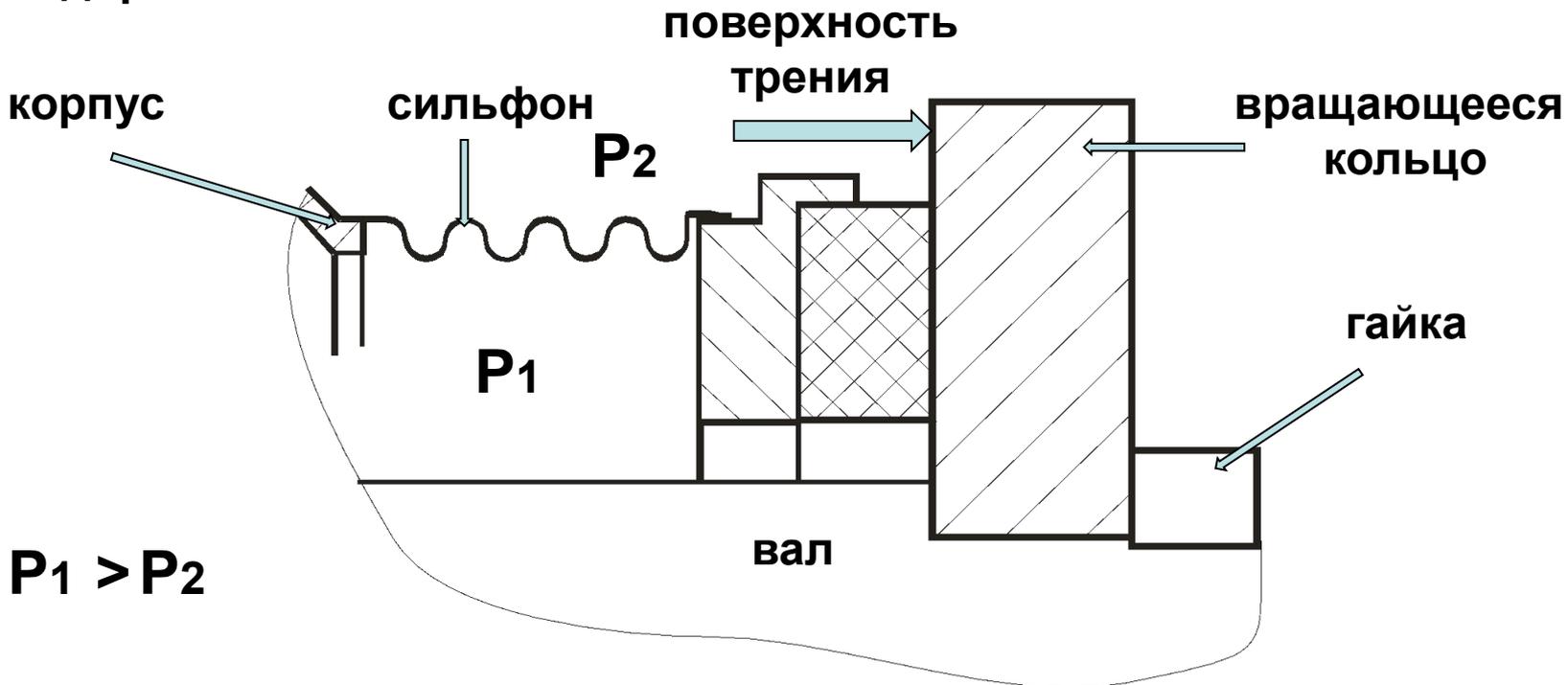
Пары трения обычно обкатывают на специальных

стендах в качестве вторичных уплотнений  
течений 2...3 часов.  
применяются

резиновые уплотнительные кольца, графитовые  
или

# СИЛЬФОННЫЕ ТКУ

В качестве вторичных уплотнений применяются резиновые уплотнительные кольца, графитовые или металлические разрезные. Можно вообще уйти от применения вторичных уплотнений, если в качестве упругого элемента использовать герметичный сильфон. Однако сильфоны держат небольшой перепад давления и дороги в изготовлении.

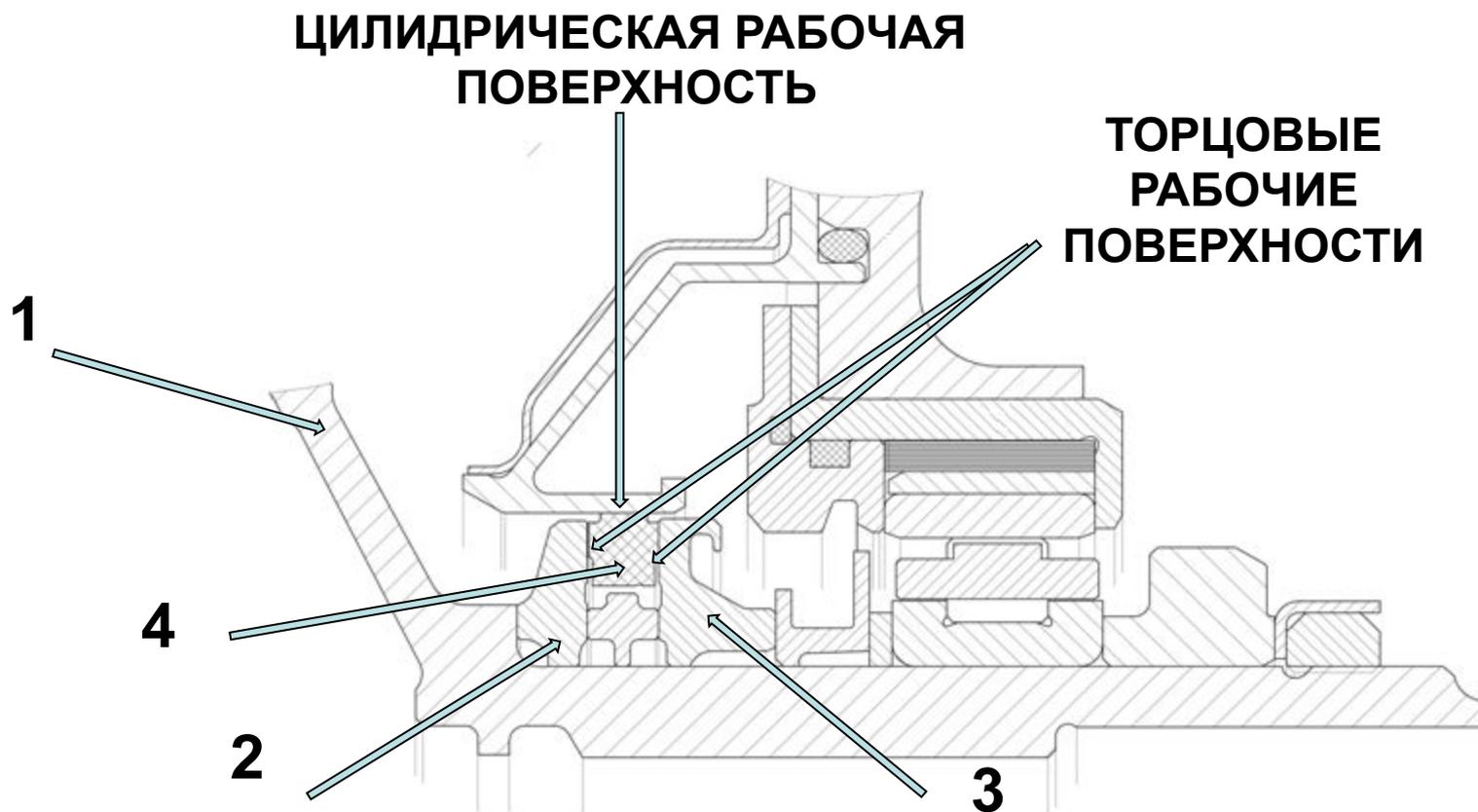


Возможности ТКУ

$\Delta P \leq 10 \text{ МПа (100 атм)}; U < 120 \text{ м/с}$

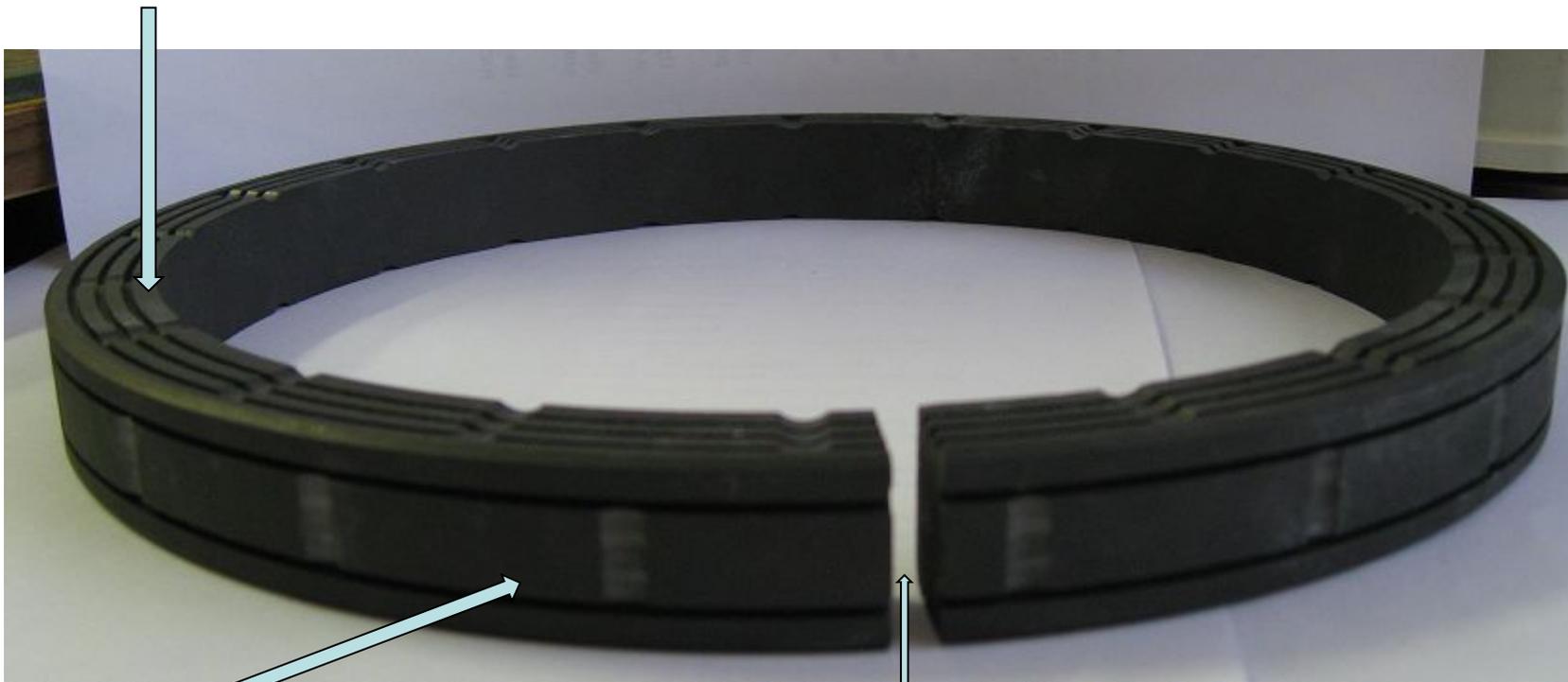
# РАДИАЛЬНО-ТОРЦОВЫЕ КОНТАКТНЫЕ УПЛОТНЕНИЯ (РТКУ)

Применяют РТКУ, состоящие из набора последовательно чередующихся графитовых и стальных колец с разделением функций торцового и радиального уплотнений, а также имеющие всего одно кольцо. На рисунке приведен пример конструкции РТКУ с одним кольцом 4. Вместе с валом ротора 1 вращаются стальные кольца 2 и 3. Графитовое кольцо осуществляет уплотнение в плоскости торца и внешней цилиндрической поверхности.



# РАЗРЕЗНОЕ ГРАФИТОВОЕ КОЛЬЦО РТКУ

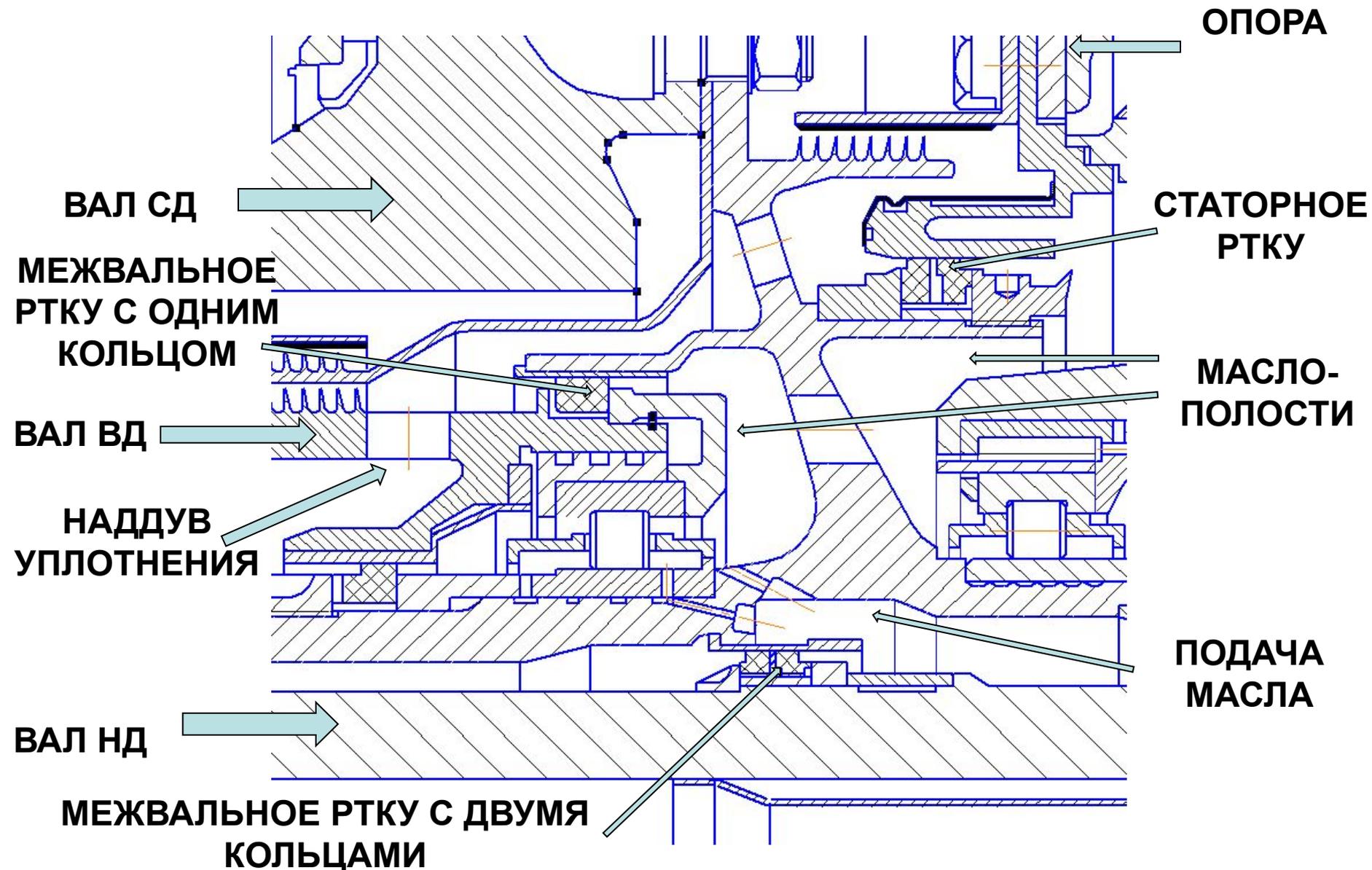
ТОРЦОВАЯ  
РАБОЧАЯ  
ПОВЕРХНОСТЬ



ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ РАБОЧАЯ  
ПОВЕРХНОСТЬ

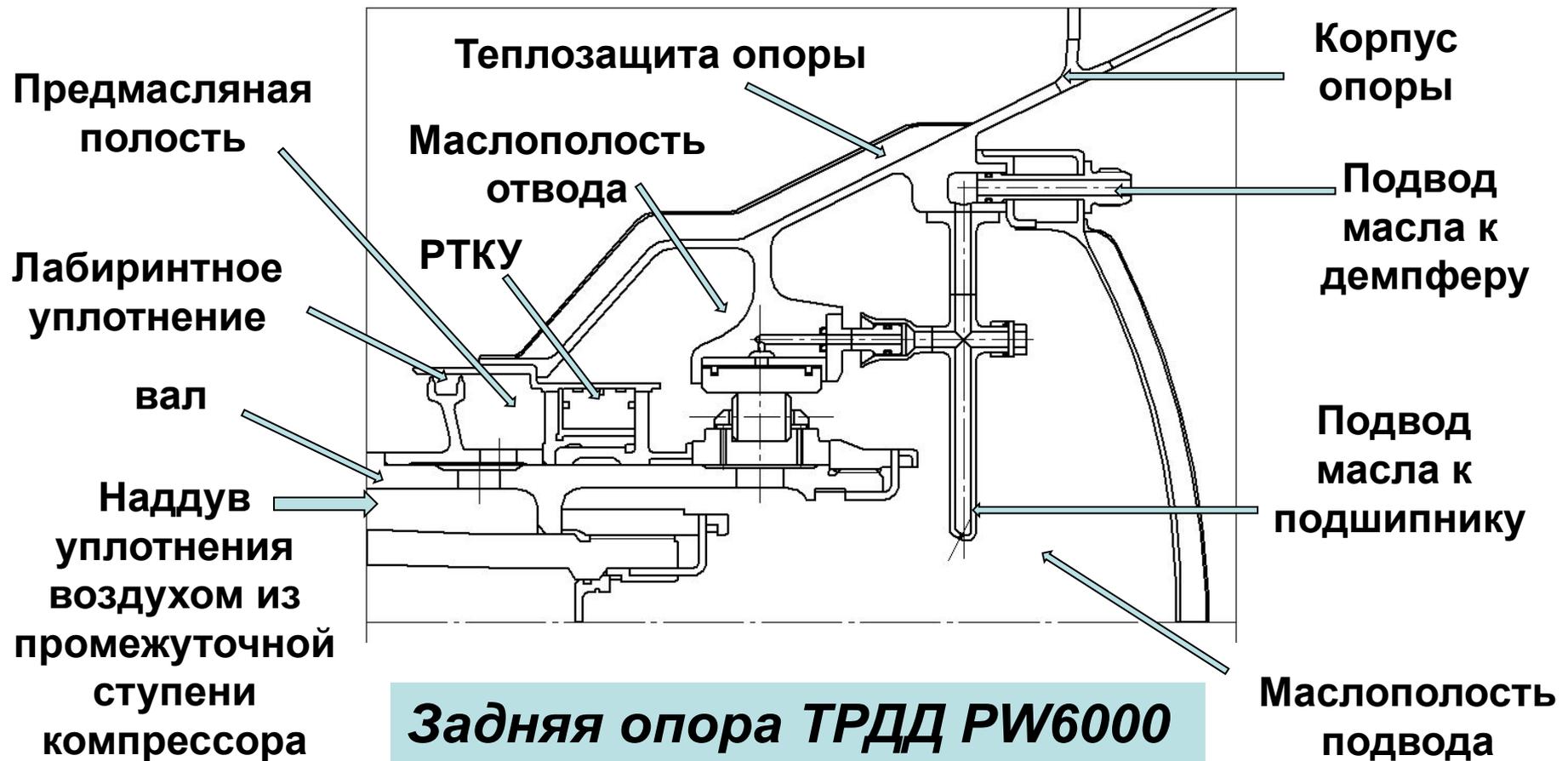
РАЗРЕЗ

# КОНСТРУКЦИЯ РТКУ ТУРБИНЫ ТРЕХВАЛЬНОГО ТРДД



# НАДДУВ УПЛОТНЕНИЙ

Наддув полости опор проводят с целью устранения проникновения масла в газоздушный тракт. Для опор КНД и турбин необходимо организовывать специально подвод воздуха в специально предусмотренные предмасляные полости. Иногда для устранения утечек масла создают небольшое разрежение в опоре (задняя опора турбины НК-12).



# **ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ НАДДУВА УПЛОТНЕНИЙ**

**Благодаря наддуву предотвращается утечка масла в проточную часть двигателя. Характеристики элементов системы наддува определяют необходимые параметры маслосистемы и системы суфлирования.**

**При проектировании системы уплотнений необходимо учесть:**

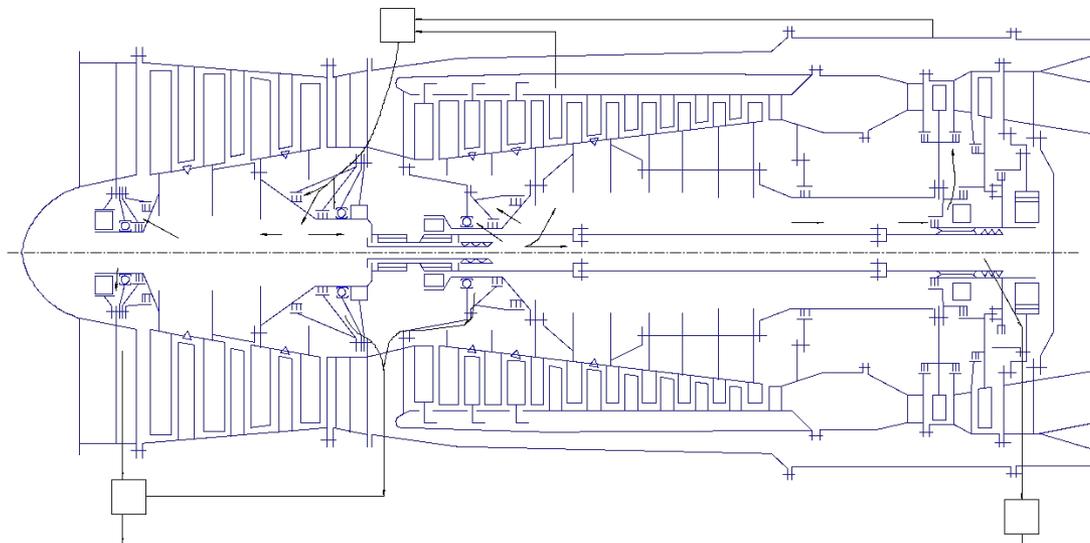
- **величины требуемых давлений наддуваемого воздуха;**
- **в соответствии с потребным давлением определить место, где расположен источник отбора воздуха;**
- **выбрать конструкцию системы транспортировки воздуха;**
- **предусмотреть элементы для регулировки системы;**
- **обеспечить охлаждение и свободу тепловых расширений, фиксацию и контроль деталей;**
- **выбрать материалы с требуемыми свойствами.**

**Обычно опоры выполняются по трехполостной схеме:**

- **масляная полость,**
- **предмасляная полость**
- **полость наддува.**

**Однако требования надежности в некоторых случаях вынуждают существенно усложнять уплотнительные узлы опор.**

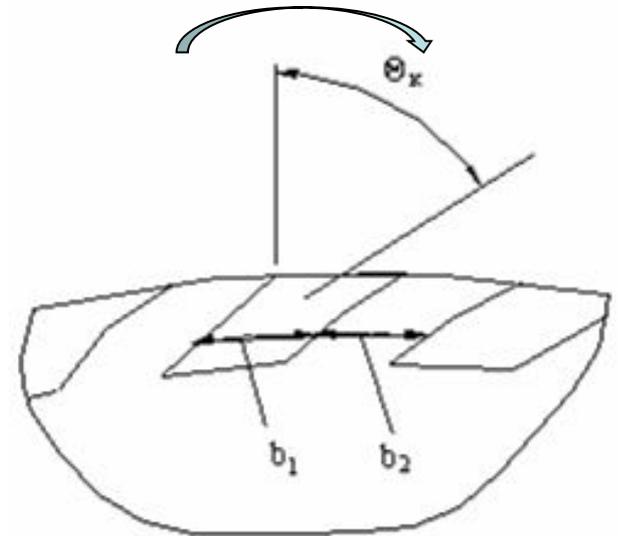
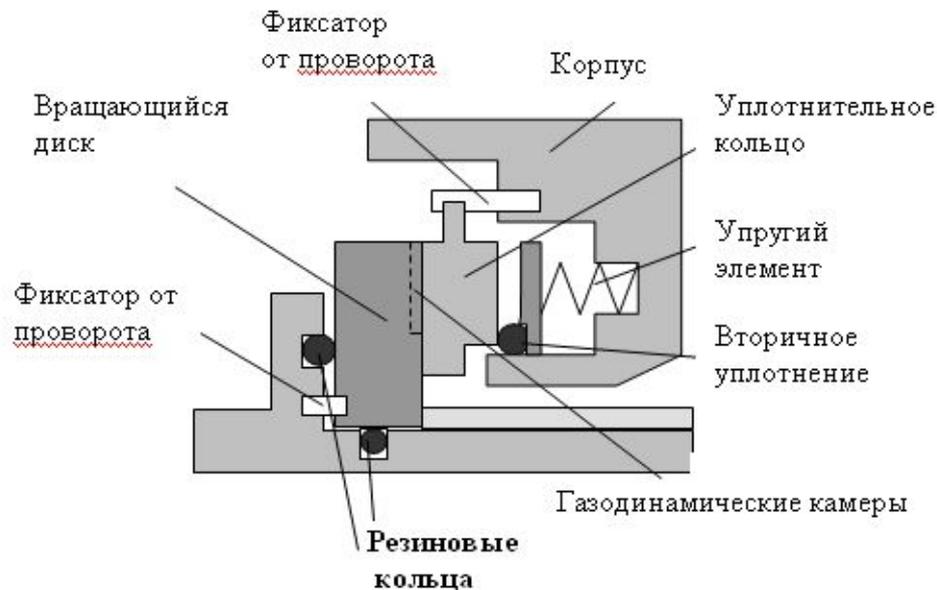
# НАДДУВ УПЛОТНЕНИЙ ТРДДФ АЛ-31Ф



Отбор воздуха в систему наддува опор двигателя производится от седьмой ступени КВД (при запуске двигателя), либо из кольцевого канала наружного контура (в условиях полета). Воздух, пройдя через внутренние полости стоек промежуточного корпуса, поступает по двум трубопроводам в полость наддува задней опоры КНД. Затем воздух поступает в полости: вала КНД, вала ТНД, ротора высокого давления, а также в разгрузочную полость КНД через лабиринтное уплотнение полости наддува задней опоры КНД. Из полости вала КНД воздух поступает в полость Наддува передней опоры КНД, из которой направляется в предмасляную полость передней опоры КНД и в полость, сообщающуюся с проточной частью двигателя. Воздух из полости вала ТНД поступает с одной стороны через лабиринтные уплотнения в предмасляную полость передней опоры КВД и предмасляную полость межвального уплотнения, а с другой стороны через отверстия в цапфе ТВД и лабиринтные уплотнения — в предмасляную полость опоры турбины.

Опоры выполнены по трехполостной схеме, в которую входят: масляная полость, предмасляная полость, полость наддува. Работа трехполостной схемы заключается в следующем. Управляемые во всех трех полостях давления обеспечивают на всех режимах работы двигателя и полета самолета постоянно направленный перепад давления (от полости наддува к масляной полости) на масляных контактных уплотнениях, в результате чего исключено попадание масла и его паров в газоздушный тракт двигателя.

# ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ТОРЦОВЫЕ УПЛОТНЕНИЯ (СУХИЕ)



Торцовое газодинамическое уплотнение (ТГДУ) состоит из вращающегося твердосплавного кольца, закрепленного на валу, и аксиально-подвижного углеграфитового кольца, размещенного внутри корпуса, предварительное поджатие которых осуществляется пружинами.

На вращающемся кольце имеется напорный участок со спиральными канавками, загнутыми в сторону вращения, и уплотнительный кольцевой пояс, отделяющий полость высокого давления от полости низкого давления.

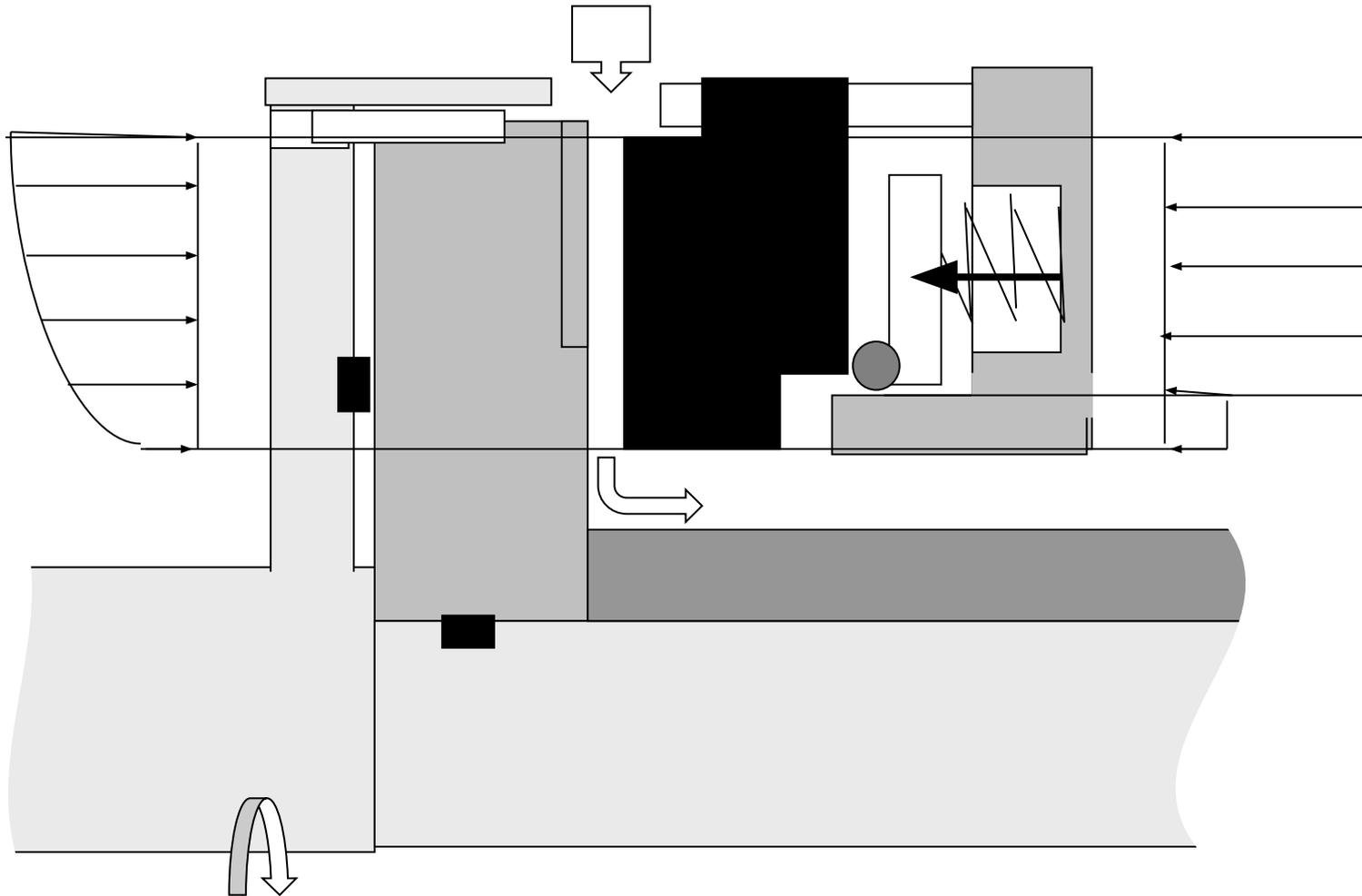
В качестве вторичных уплотнений используются резиновые кольца. Обычно от действия силовых и температурных нагрузок уплотнительный зазор имеет конусность .

# СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ В ТГДУ

Несущая способность  
газового слоя

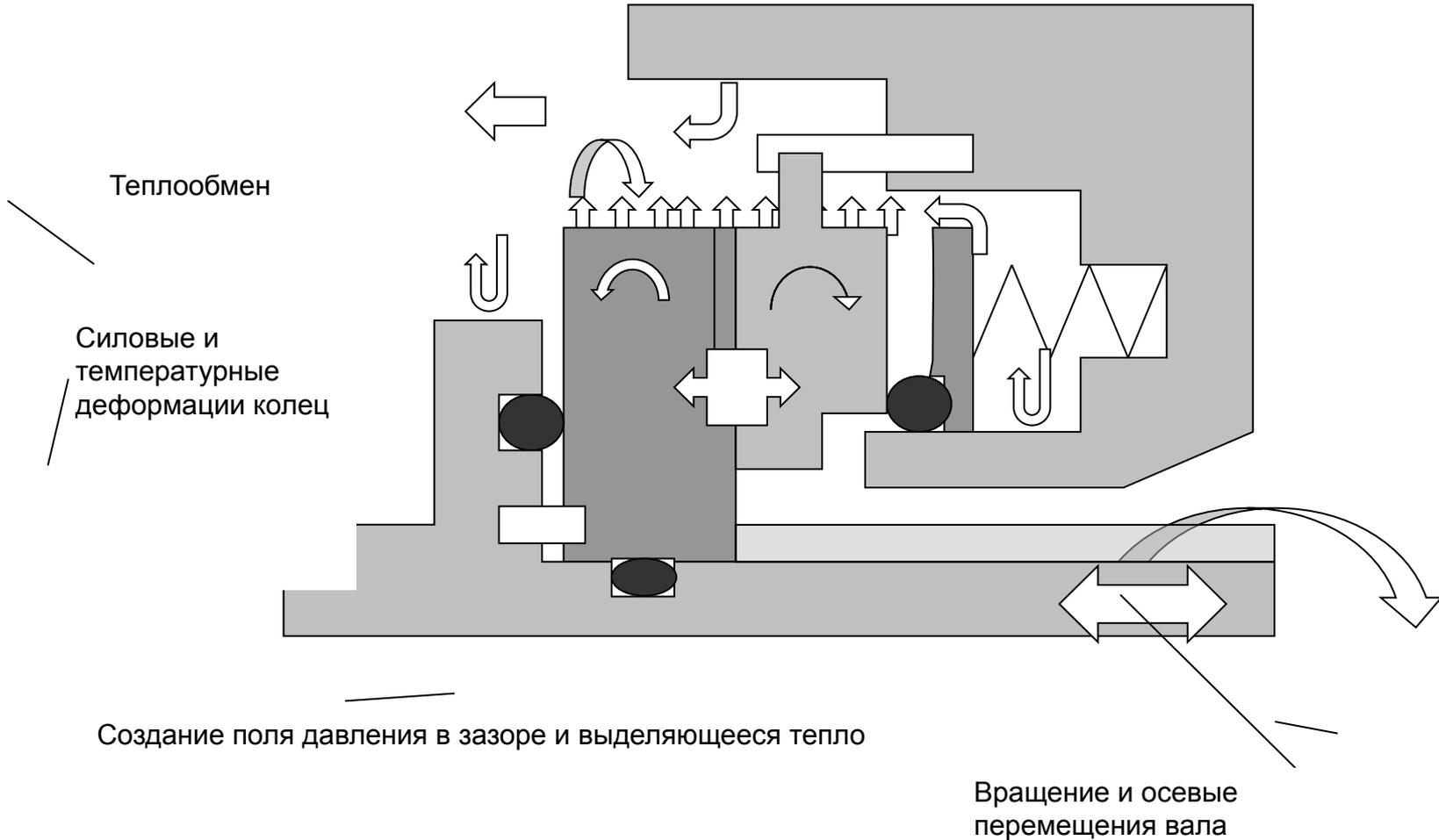
Усилие  
пружин

Внешняя  
нагрузка



# ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТГДУ

Течение охлаждающего газа в полости перед уплотнением



# ПАРЫ ТРЕНИЯ



**Лучшим из мягких графитов является электрографит с пропиткой сурьмой; из твердых сплавов - карбид кремния. Возможна комбинация SiC-SiC для напряженных условий работы уплотнения. В этом случае на рабочие поверхности наносится тонкий слой (1...3 мкм) изнашиваемого графитового (алмазного) покрытия, чтобы исключить сухое трение при пуске и останове турбомашин.**

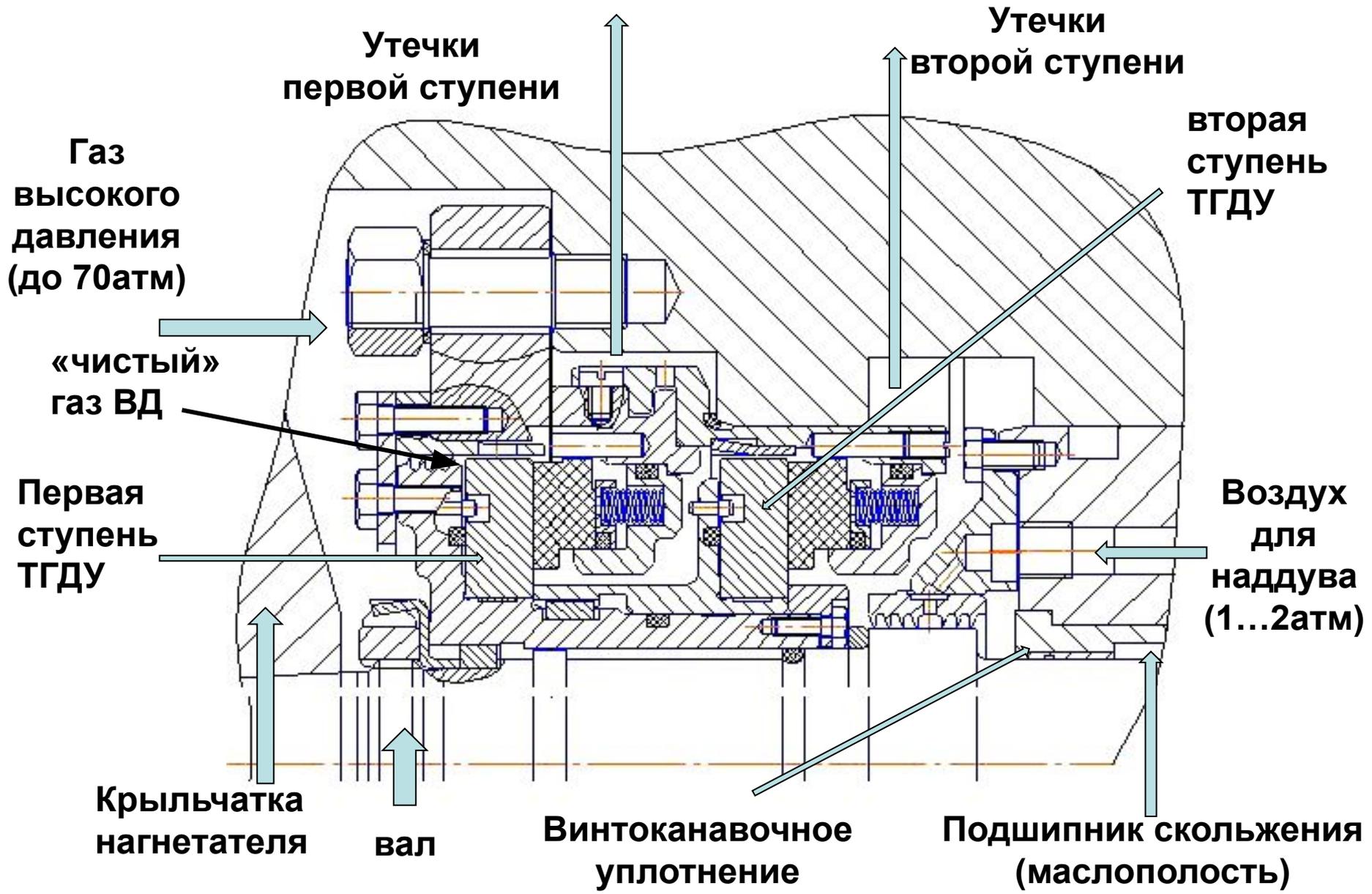
# **РАБОТА «СУХИХ» УПЛОТНЕНИЙ**

**ТГДУ работает по принципу уравнивания газостатических и газодинамических сил, действующих на аксиально-подвижное и вращающееся кольца.**

**При стоянке под действием газостатических сил и сил предварительного сжатия пружин уплотнительные кольца прижаты друг к другу. При этом утечки газа через уплотнение не происходит.**

**Очищенный газ с давлением, несколько превышающим давление всасывания компрессора, подается в полость перед уплотнением. Из нее часть газа поступает через внутреннее лабиринтное уплотнение в сторону полости компрессора, тем самым отсекая грязный рабочий газ, а часть дросселируется через пару трения ТГДУ.**

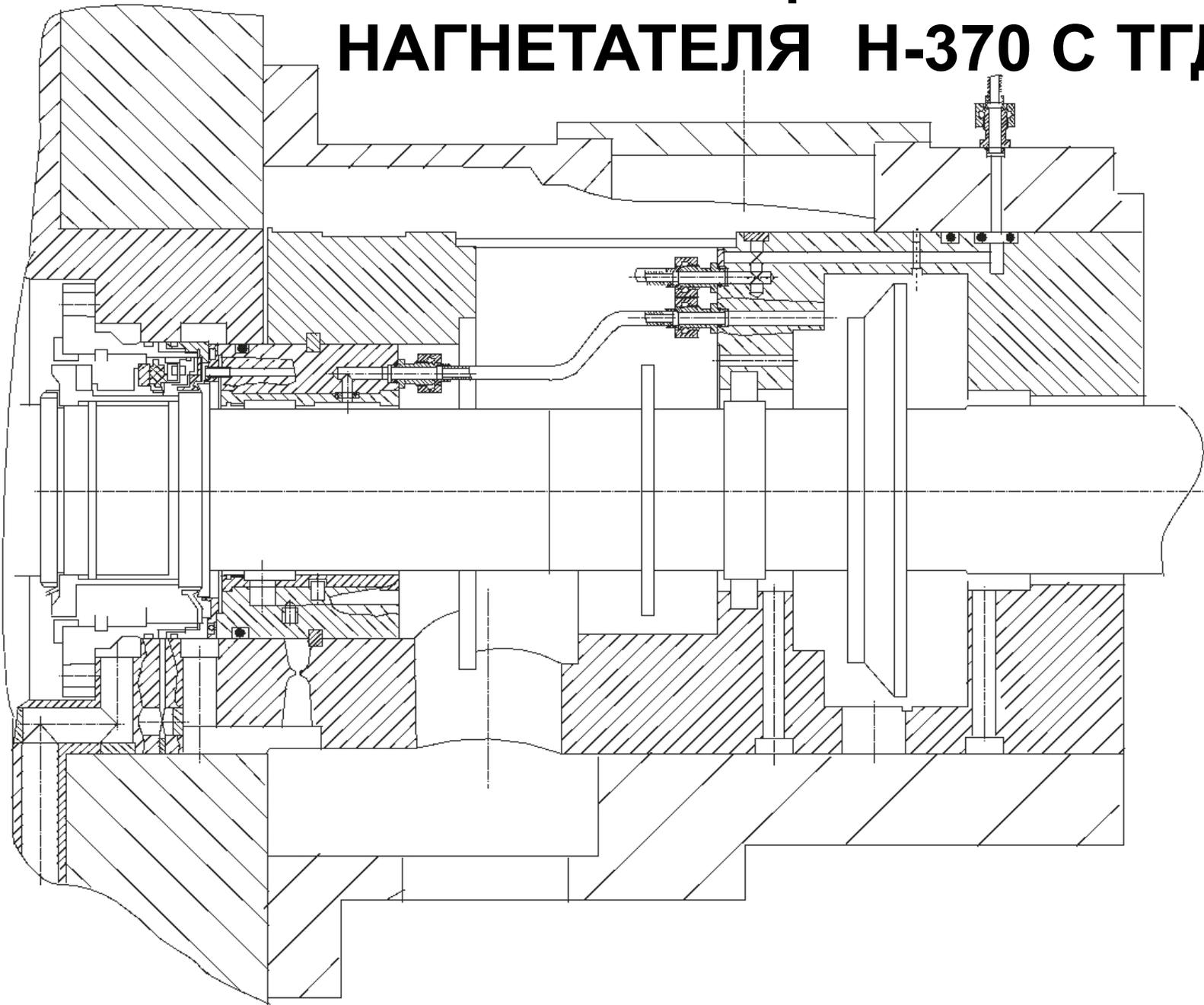
# КОНСТРУКЦИЯ ТГДУ ДЛЯ СТАЦИОНАРНОГО НАГНЕТАТЕЛЯ Н-370



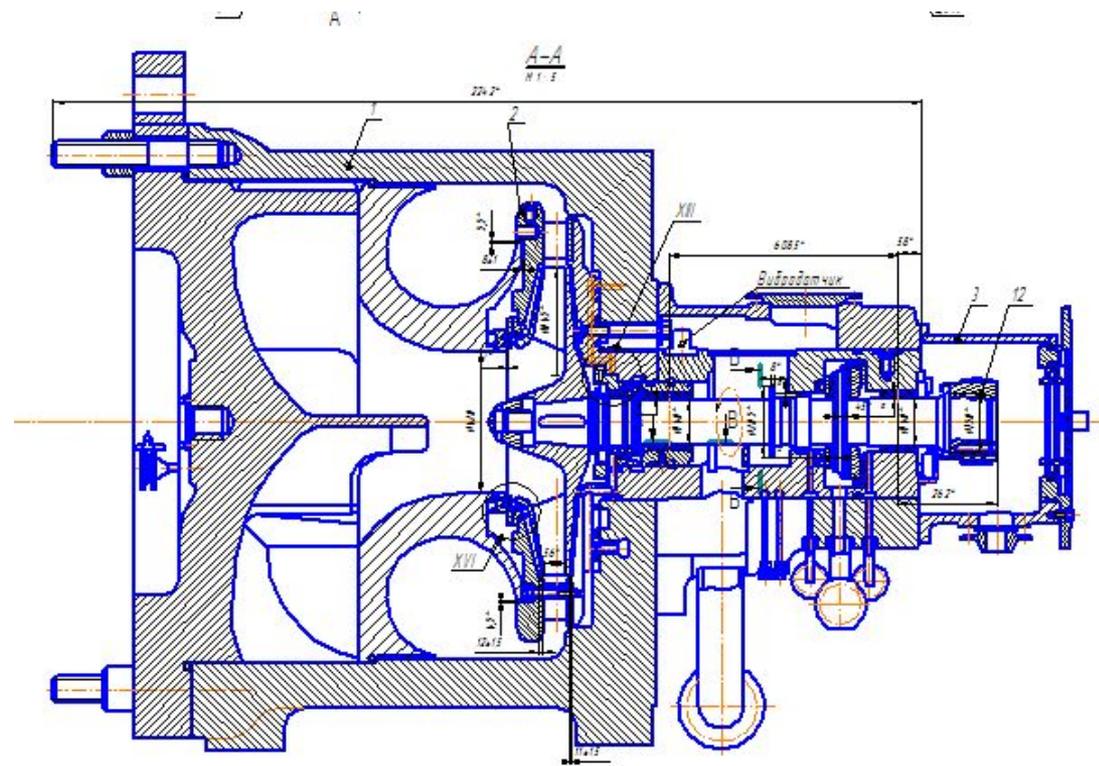
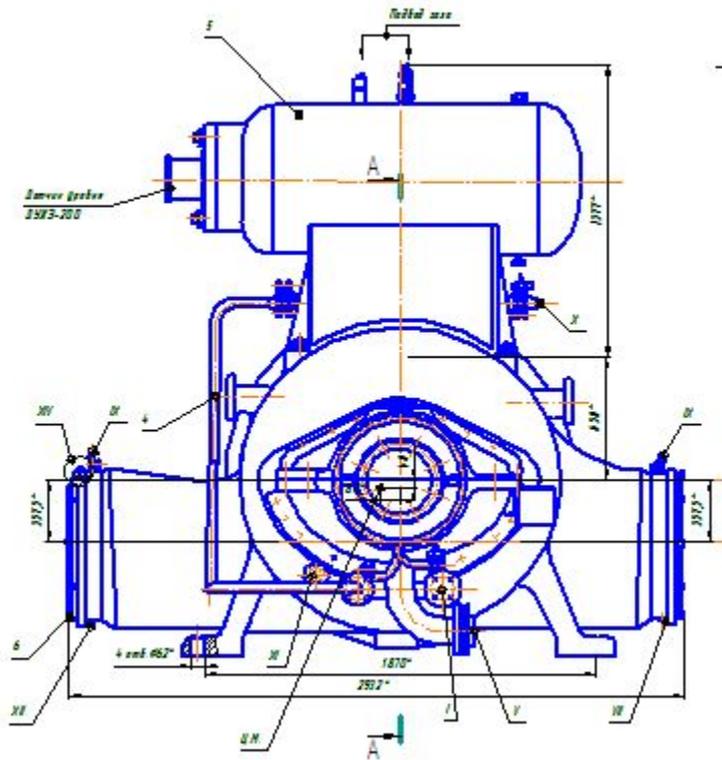
# ФОТОГРАФИЯ ТГДУ ДЛЯ СТАЦИОНАРНОГО НАГНЕТАТЕЛЯ Н-370



# РОТОР СТАЦИОНАРНОГО НАГНЕТАТЕЛЯ Н-370 С ТГДУ



# ОБЩИЙ ВИД СТАЦИОНАРНОГО НАГНЕТАТЕЛЯ Н-370



# **ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОДШИПНИКИ РОТОРОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

**Альтернативой традиционным подшипникам скольжения может стать электромагнитный подвес. Электромагнитный подшипник (ЭМП) принципиально отличается от подшипников всех других типов отсутствием механического контакта между движущейся и опорной частями, что и обуславливает ряд преимуществ:**

- Отсутствие изнашивания**
- Низкие уровни вибрации, трения и нагрева**
- Управляемость характеристиками жесткости и демпфирования**
- Экологическую чистоту**
- Практически неограниченные частоты вращения.**

**ЭМП являются опорами активного типа. Перемещения ротора в радиальном направлении замеряются двумя датчиками 1 и 2 (см. следующий слайд), расположенными в двух плоскостях по оси энергетической установки, причем в каждой плоскости имеются по два датчика, расположенных взаимно перпендикулярно. Осевые перемещения измеряются одним датчиком 3. Датчики смещения должны обеспечивать бесконтактное измерение зазора в диапазоне 0,2...1мм с точностью не менее 0,01мм. Ток в ЭМП регулируется электронной аппаратурой, управляемой по сигналам с датчиков положения ротора.**



# **РАБОТА РОТОРА ЭУ С ЭМП**

**Соответствующий выбор закона регулирования тока позволяет обеспечить устойчивое положение ротора и его центровку в зазоре, а также получить заданные характеристики колебаний ротора по жесткости и демпфированию опор.**

**Для обеспечения нормальной остановки машины в случае аварийного отключения тока используются страховочные подшипники качения 4 и 5 с набивной консистентной смазкой.**

**В конструкции машины с ЭМП должна быть предусмотрена система продувки подшипниковых камер воздухом с целью обеспечения**

**взрывозащиты электротехнического оборудования и предотвращения проникновения внутрь оболочек природного газа. Ориентировочный расход воздуха для продувки не менее 2м<sup>3</sup>/мин при давлении 400Па.**

**Для предотвращения попадания газа в полости подшипников должны быть предусмотрены уплотнения 6 и 7. Должно быть также предусмотрено концевое уплотнения 8 для герметизации выхода вала в месте расположения с соединительной муфтой 9 привода турбомашин. Опорами турбомашин являются два радиальных 10,11 и один упорный 12 ЭМП.**

# **ОСНОВНЫЕ ПРОИЗВОДИТЕЛИ ЭМП**

**Одним из лидеров разработки и внедрения ЭМП за рубежом является французская фирма S2M, имеющая филиалы в США и Японии. К концу 90-х годов при ее участии были разработаны и изготовлены в общей сложности более 100 машин с ЭМП, в том числе турбодетандеры, компрессоры для химических и газоперекачивающих предприятий, турбонасосы, высокооборотные шпиндели для металлообрабатывающих станков и др.**

**В настоящее время многие зарубежные машиностроительные фирмы также ведут разработку систем ЭМП для своих агрегатов.**

**В России работы по созданию ЭМП были начаты в начале 80-х годов и имели целью создание устройств стабилизации и ориентации космических аппаратов. В настоящее время ЭМП нашли применение в газовой промышленности в качестве опор газовых компрессоров.**

**Пять ГПА – Ц16, в составе которых компрессоры с такими опорами, работают на компрессорных станциях в Сызрани и Тольятти уже более 10 лет. К настоящему времени их суммарная наработка превысила 200 тысяч часов. Разработчик – ВНИИЭМ, Москва.**

# ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОДШИПНИКИ

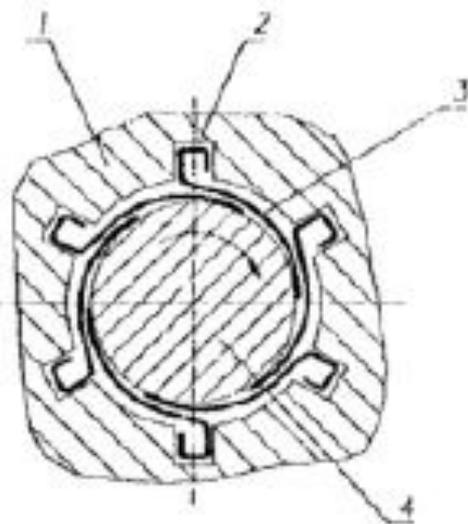
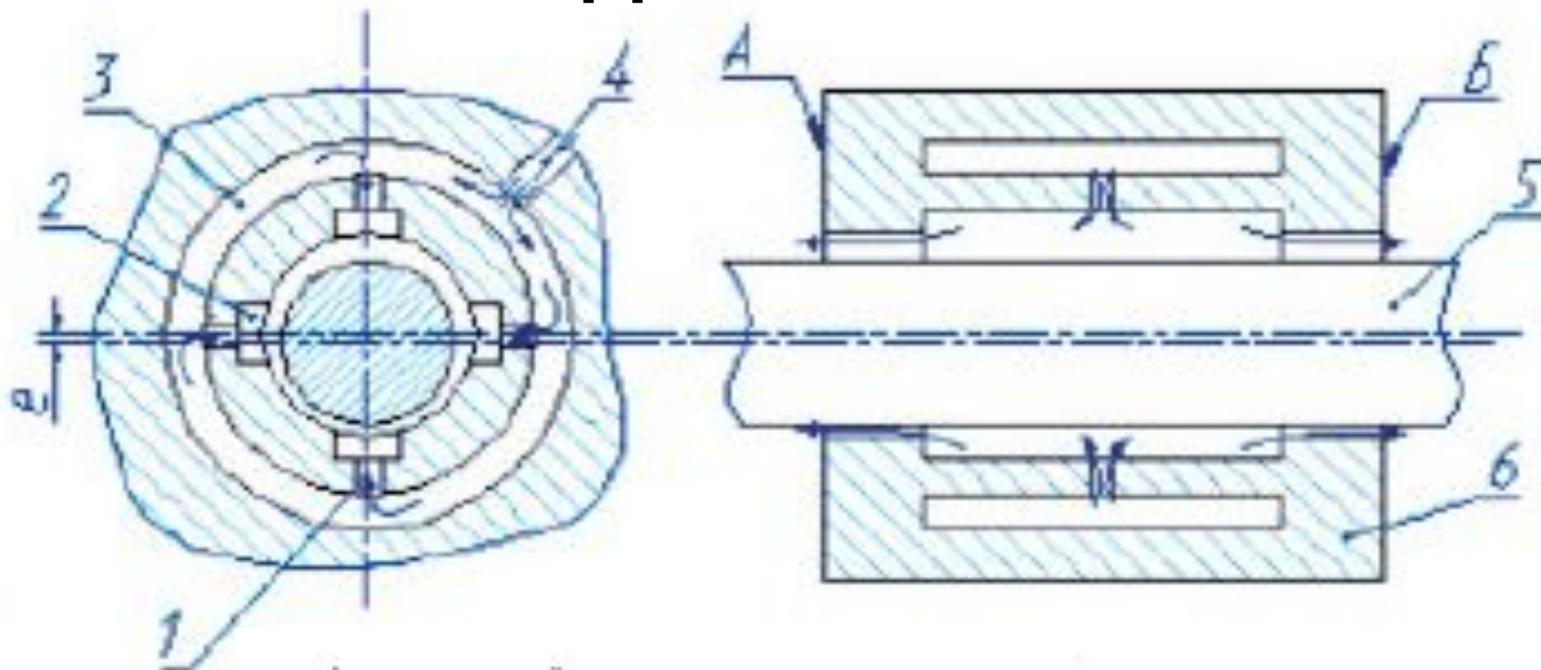
Основная идея состоит в том, чтобы существенно повысить надежность и обеспечить многоразовое эксплуатирование двигателей подобного типа за счет использования во вращающихся частях бесконтактных газостатических опор. Отсутствие контакта на рабочих режимах, а следовательно, контактного трения, отсутствие необходимости в смазке, возможность обеспечения высоких частот вращения, относительная простота и малый вес конструкции делают такие опоры весьма привлекательными там, где требуется легкость, компактность и надежная работа без обслуживания.

Турбокомпрессоры и насосы комбинированного двигателя, оснащенные подшипниками подобной конструкции, будут иметь меньшие габариты и потенциально бесконечный ресурс использования.

## Технология газовых подвесов

Сегодня газовые опоры используются в турбомашинах, криогенных и высокотемпературных космических, наземных, транспортных и глубоководных установках, компрессорах атомных реакторов, в особо точных и надежных гироскопах, а также приборах со скоростью вращения вала до 500.000 об/мин. Конструкция типичного радиального ГСП позволяет вращаться валу, не касаясь неподвижных стенок. Для этого через систему специальных клапанов (дросселей) 1 и форкамеры 2 из коллектора 3 подается газ 4. Для того чтобы под воздействием возмущений вал 5 не касался корпуса 6, подачей воздуха в дроссели должна управлять система автоматического управления (САУ). Торцы А и Б могут выполнять функции упорного диска, что позволяет превратить ГСП в радиально-упорный подшипник.

# КОНСТРУКЦИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ



**ЛЕПЕСТКОВЫЙ  
ПОДШИПНИК**

# **«ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ» АВИАЦИОННЫЙ ГТД**