

# Тема: Компрессоры ГТД

## 1. Требования, предъявляемые к компрессорам

## 2. Конструктивные схемы компрессоров

Центробежные компрессоры  
Осевые компрессоры  
Осецентробежные компрессоры

## 3. Роторы компрессоров

Типы роторов  
Соединение элементов

## 3. Лопатки компрессоров

Требования  
Соединения с диском  
Особенности крупногабитных лопаток вентиляторов

## 4. Корпусы компрессоров

Типы корпусов, основные элементы конструкции  
Направляющие аппараты  
Механизация компрессора  
Защита от попадания посторонних предметов

## 5. Материалы деталей компрессоров

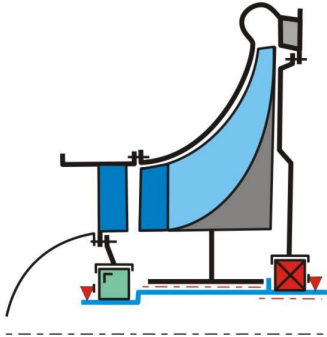
# Требования, предъявляемые к компрессорам

- обеспечение заданного секундного расхода воздуха  $Gв$
- обеспечение заданной степени повышения давления  $\pi_K^*$
- обеспечение заданного КПД (экономичность)
- обеспечение устойчивой работы в заданном диапазоне  $n$ .

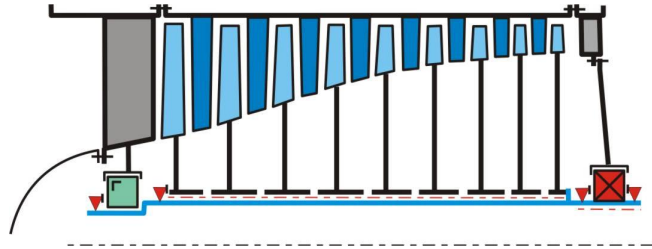
- надежность
- живучесть
- обеспечение заданного ресурса
- контролепригодность
- пожаробезопасность

- минимальная масса и габариты
- технологичность производства
- эксплуатационная технологичность
- минимальная себестоимость производства
- возможность развития
- экологические ограничения (по шуму)

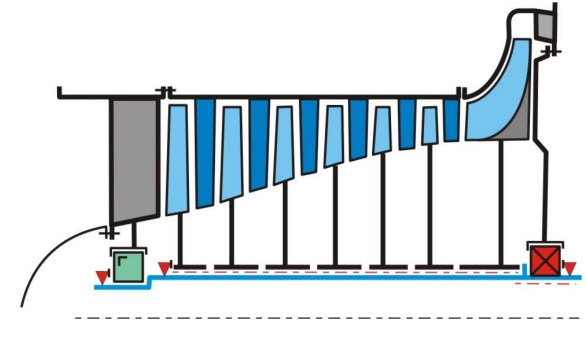
## Центробежные компрессоры



## Осевые компрессоры



## Осецентрированные компрессоры



- высокая степень сжатия в одной ступени (5 и более)
- простота
- малая длина и вес



- не более двух ступеней - низкая суммарная степень сжатия
- высокие гидравлич.потери
- большой диаметр



- высокая степень сжатия
- малый диаметр



- сложность
- неустойчивость (помпаж)
- мелкие лопатки и большие отн.радиальные зазоры на последних ступенях при малой размерности -



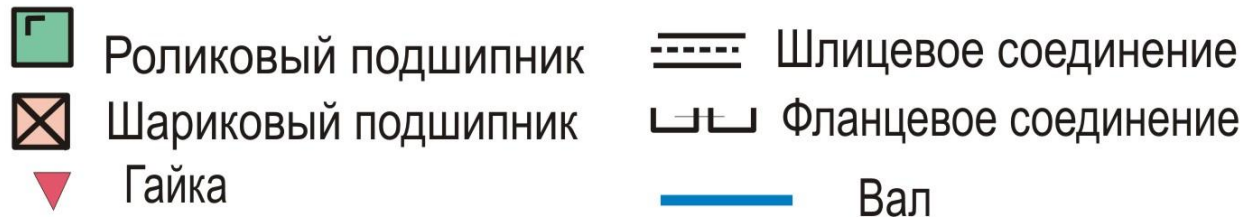
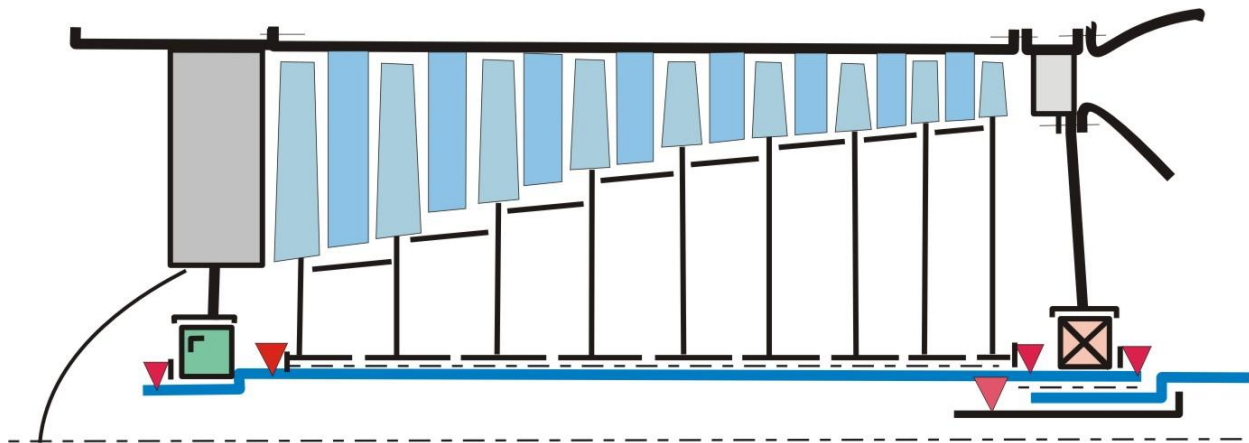
- высокая степень сжатия
- простота
- нет мелких лопаток



- высокие гидравлич.потери
- большой диаметр

## Осевые компрессоры

Типичная конструктивная и силовая схема осевого компрессора ТРД

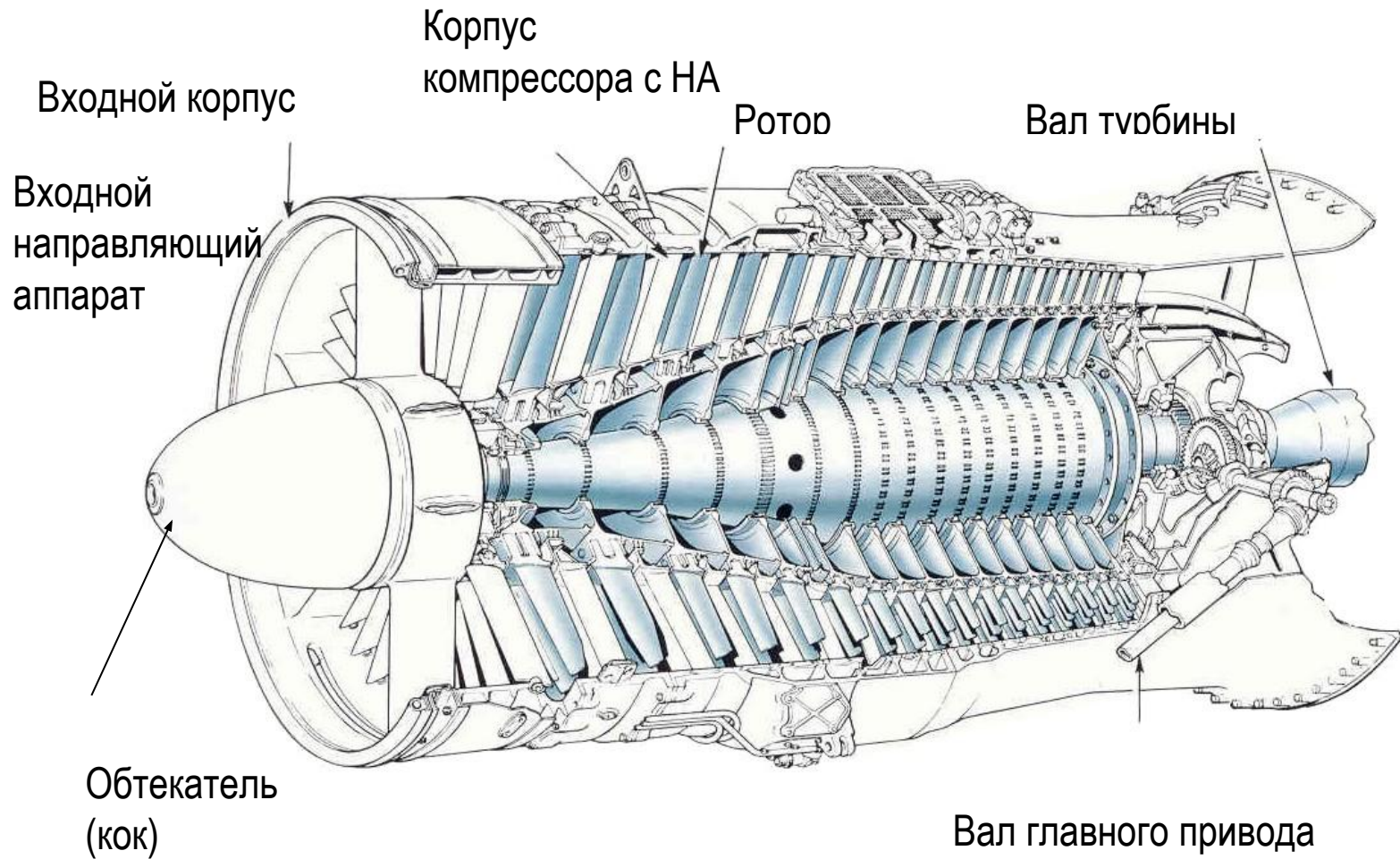


## Классификация

1- 2- 3-каскадные

1- 2- 3-вальные

Однокаскадный компрессор ТРД



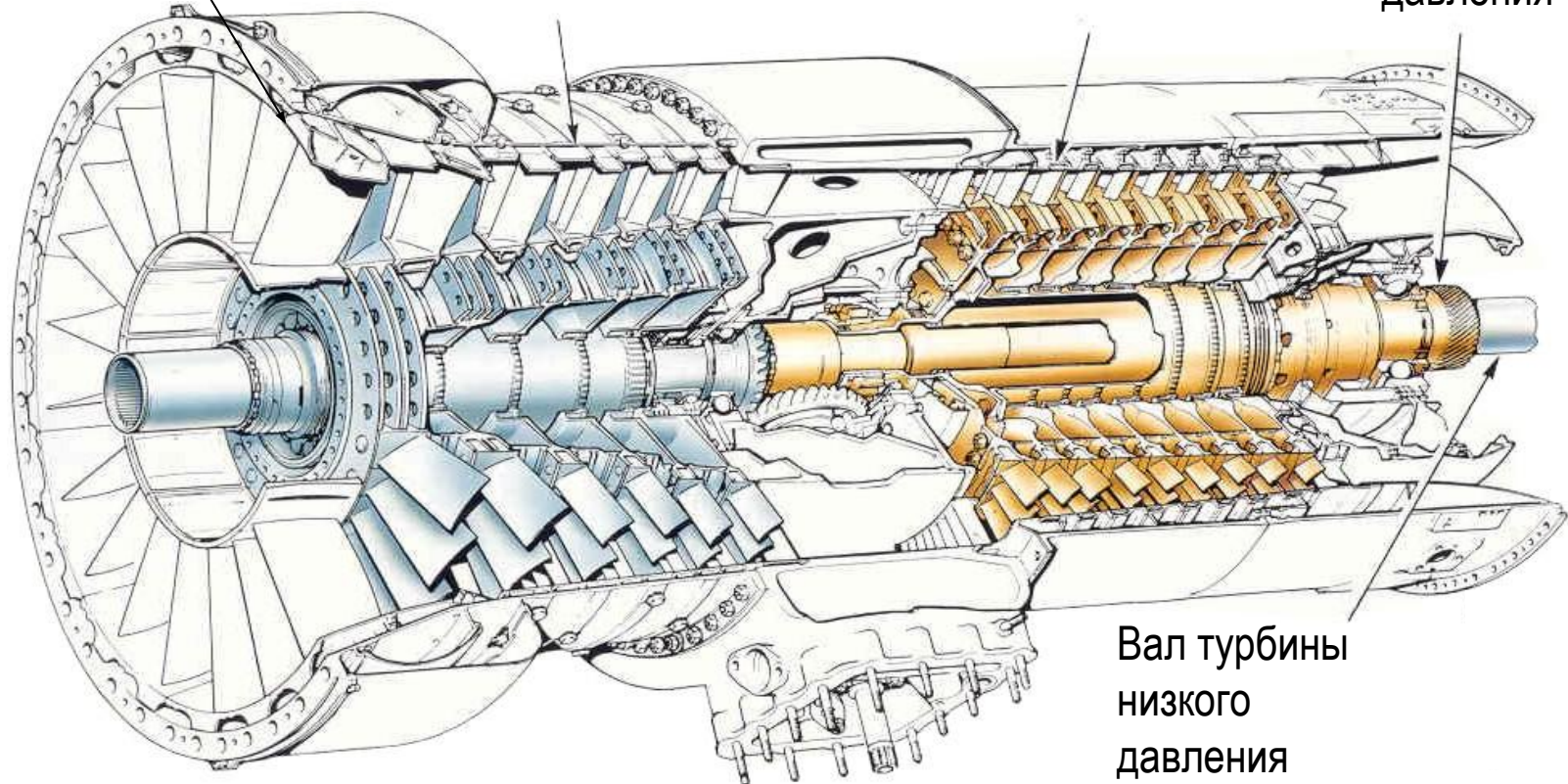
## Двухкаскадный компрессор одноконтурного ТРД

Входной  
направляющий  
аппарат

КНД

КВД

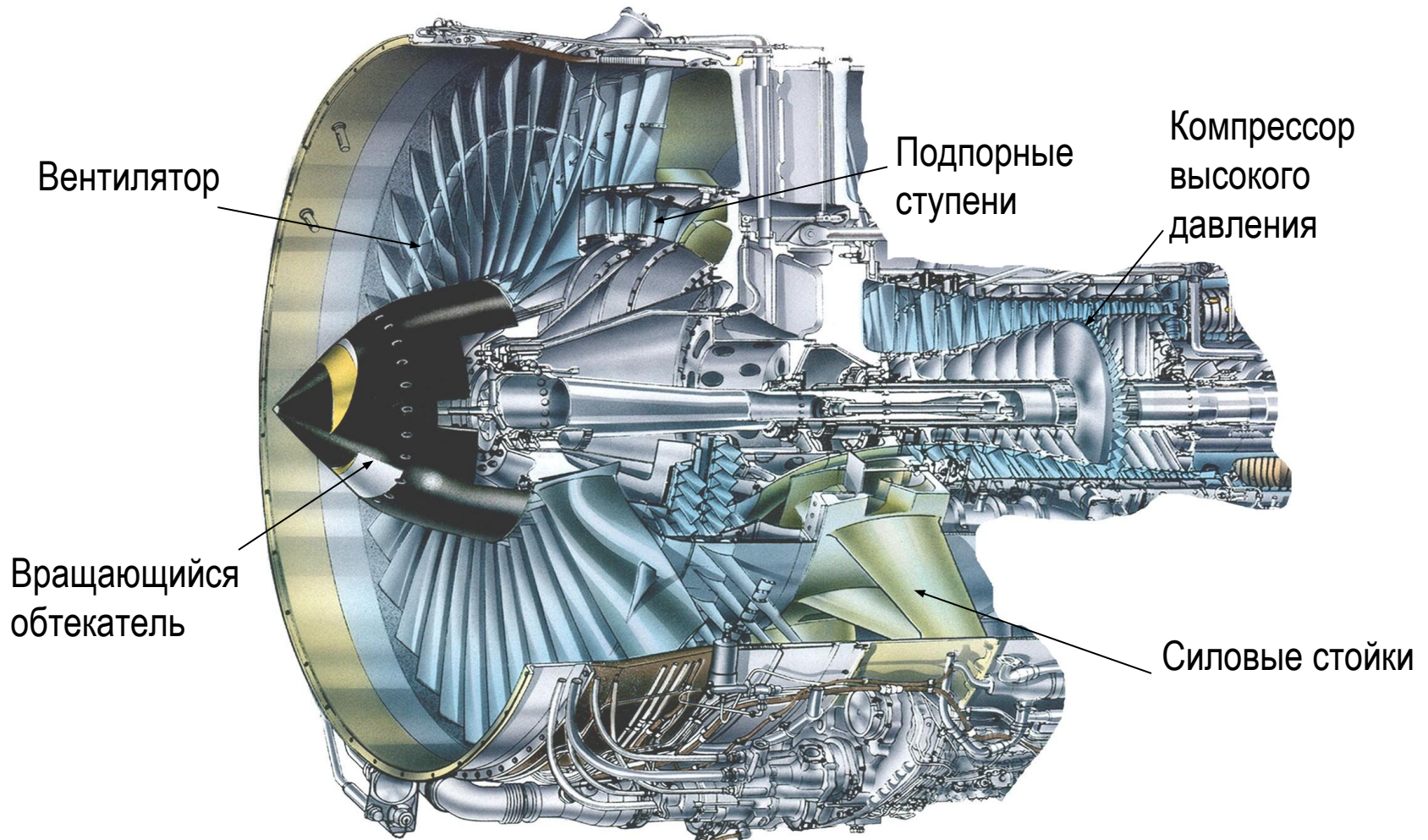
Вал турбины  
высокого  
давления



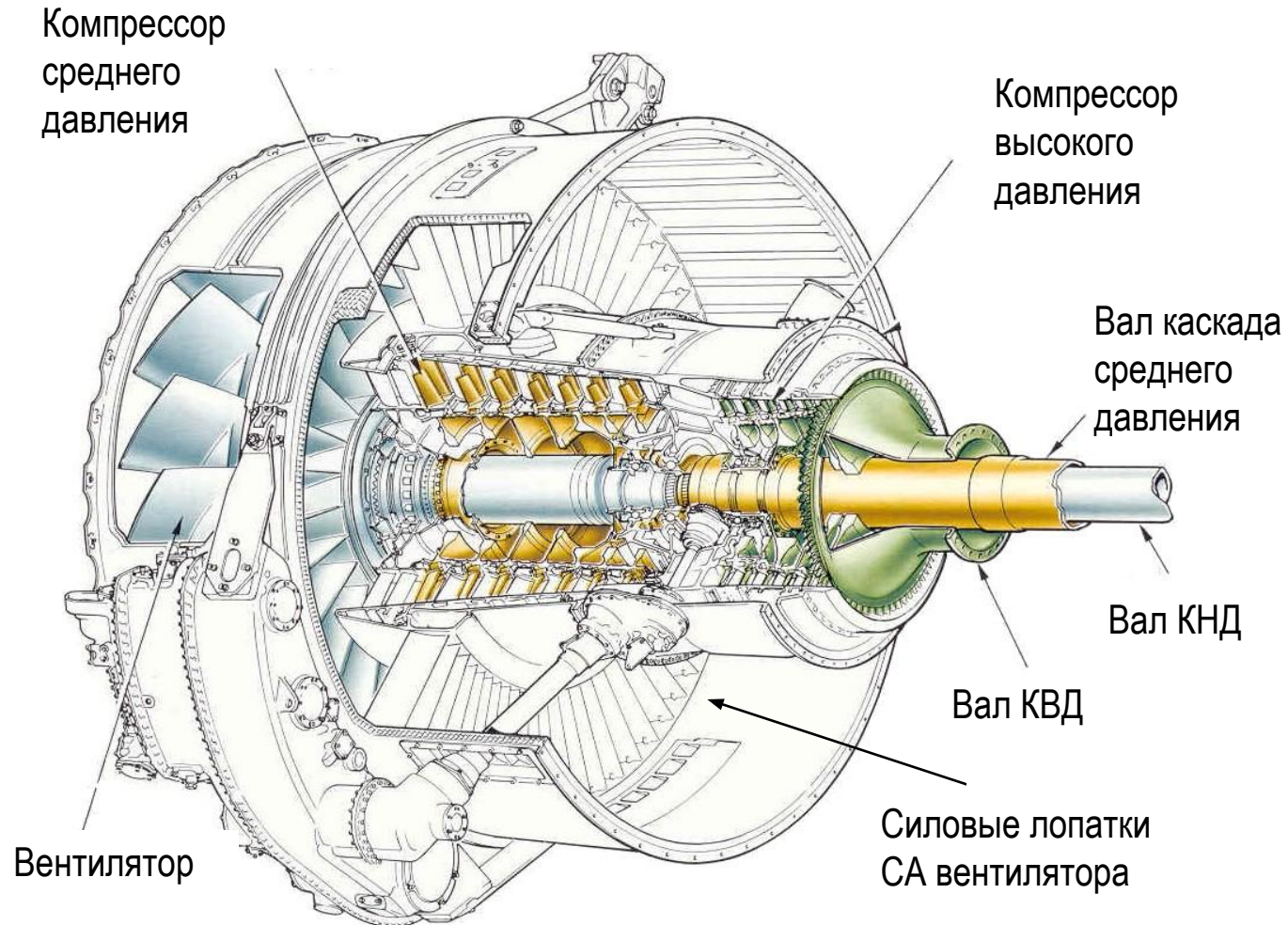
Вал турбины  
низкого  
давления

Конструктивные схемы компрессоров  
Осевые компрессоры

Двухкаскадный компрессор ТРДД с большой степенью двухконтурности



Трёхкаскадный компрессор ТРДД с большой степенью двухконтурности





## Роторы осевых компрессоров

### Требования:

- передача крутящего момента;
- передача осевых усилий;
- обеспечение требуемой изгибной жесткости;
- обеспечение высокой крутильной жесткости;
- обеспечение соосности элементов на всех режимах работы;
- минимальная масса элементов ротора;
- минимальный статический и динамический дисбаланс

### Классификация:

#### По расположению относительно опор:

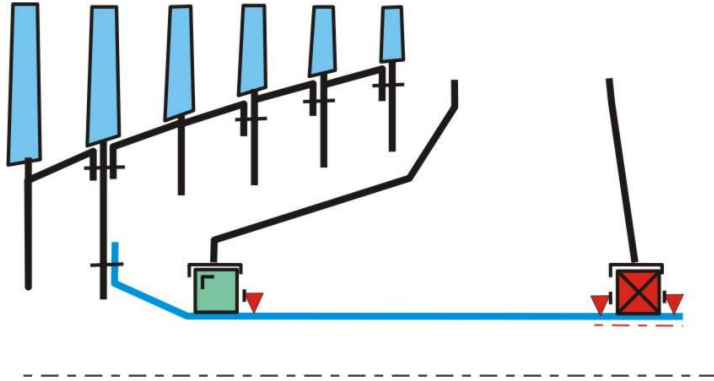
- межопорные;
- консольные;
- комбинированного расположения.

#### По конструктивной схеме:

- барабанные;
- дисковые;
- барабанно-дисковые

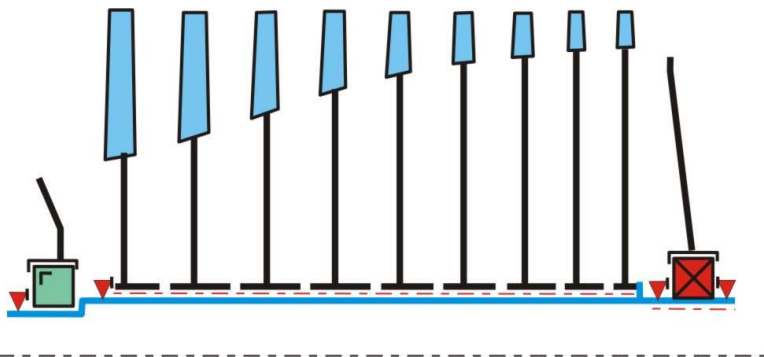
## Роторы осевых компрессоров

### Ротор с консольным расположением



- ⊕ - отсутствие силовых стоек на входе в компрессор
- минимальные осевые размеры компрессора
- возможна организация единой масляной полости обеих опор
- ⊖ - высокая радиальная нагрузка на переднюю опору
- не применим с роторами дискового типа
- малое число ступеней компрессора

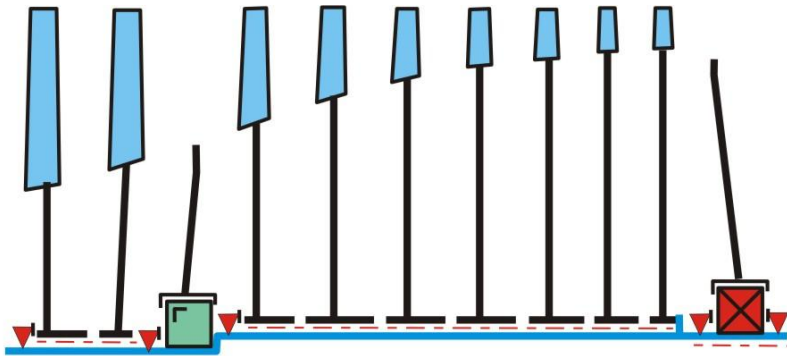
### Ротор с межопорным расположением



- ⊕ - большое количество ступеней компрессора
- равномерная радиальная нагрузка на опоры
- применим для роторов всех типов
- ⊖ - наличие силовых стоек на входе в компрессор
- отдельные масляные полости опор

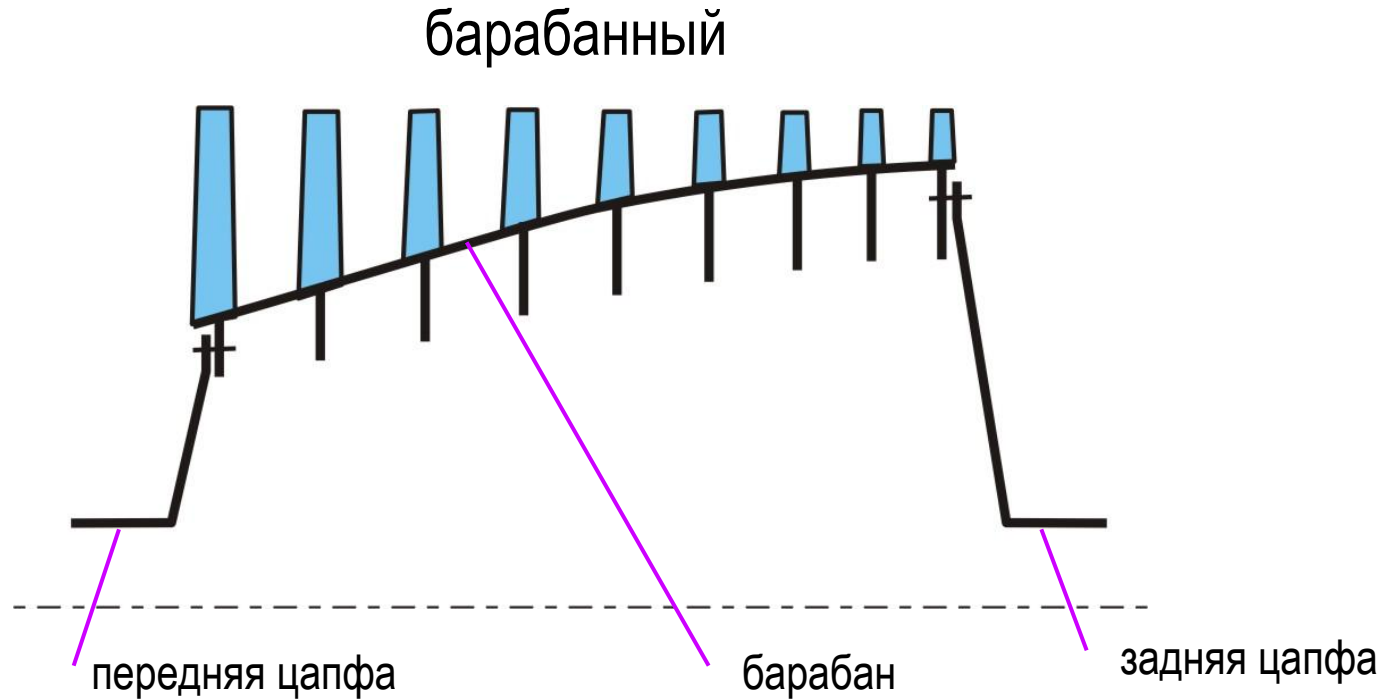
## Роторы осевых компрессоров

### Ротор с комбинированным расположением относительно опор



- ⊕ - большое количество ступеней компрессора
- отсутствие силовых стоек на входе в компрессор
- ⊖ - высокая радиальная нагрузка на переднюю опору
- сложность сборки
- увеличенные осевые размеры
- сложность организации масляной полости передней опоры

## Основные типы роторов осевых компрессоров

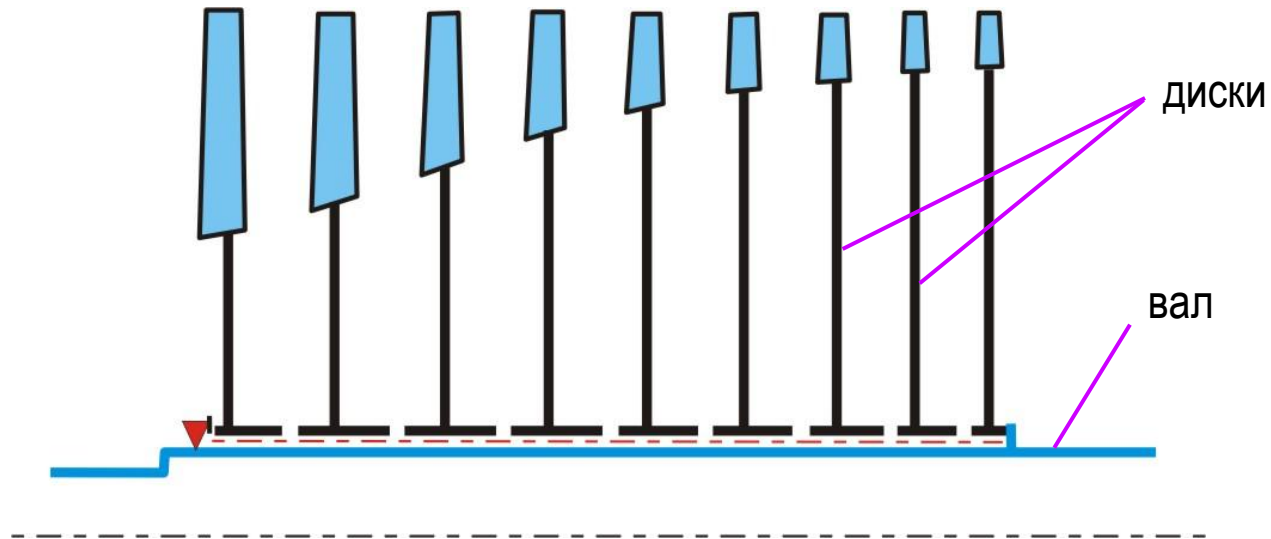


- ⊕ •Простота конструкции и сборки
- Высокая изгибная и крутильная жесткость
- Низкий вес

- ⊖ •Низкая несущая способность
- Низкий КИМ
- Сложность изготовления барабана

## Основные типы роторов осевых компрессоров

### ДИСКОВЫЙ



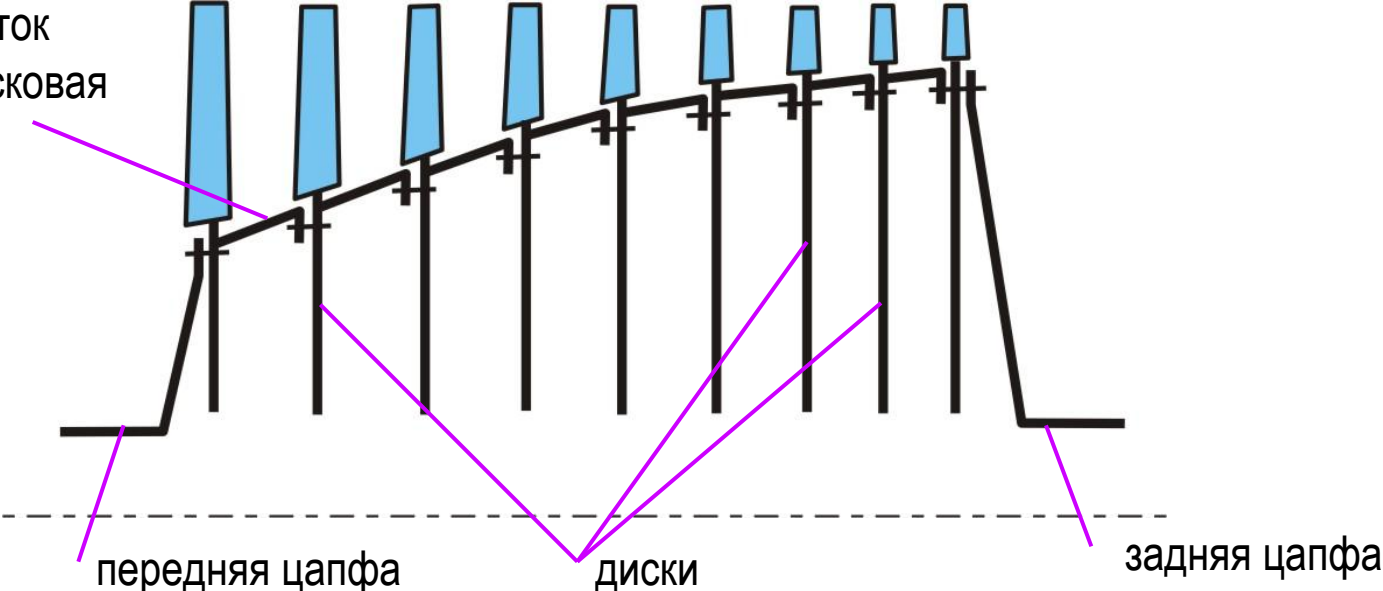
⊕ •Высокая несущая способность

⊖ •Низкая изгибная и крутильная жесткость  
•Большой вес  
•Сложность обеспечения соосности

# Основные типы роторов осевых компрессоров

## барabanно-дисковый

барabanный участок  
диска или междисковая  
проставка

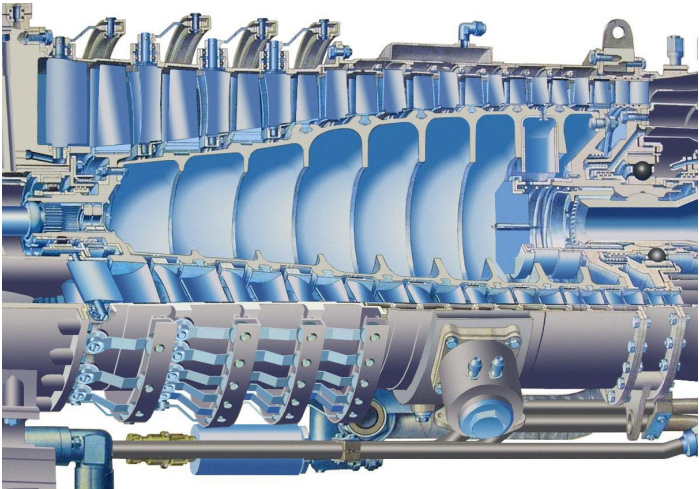
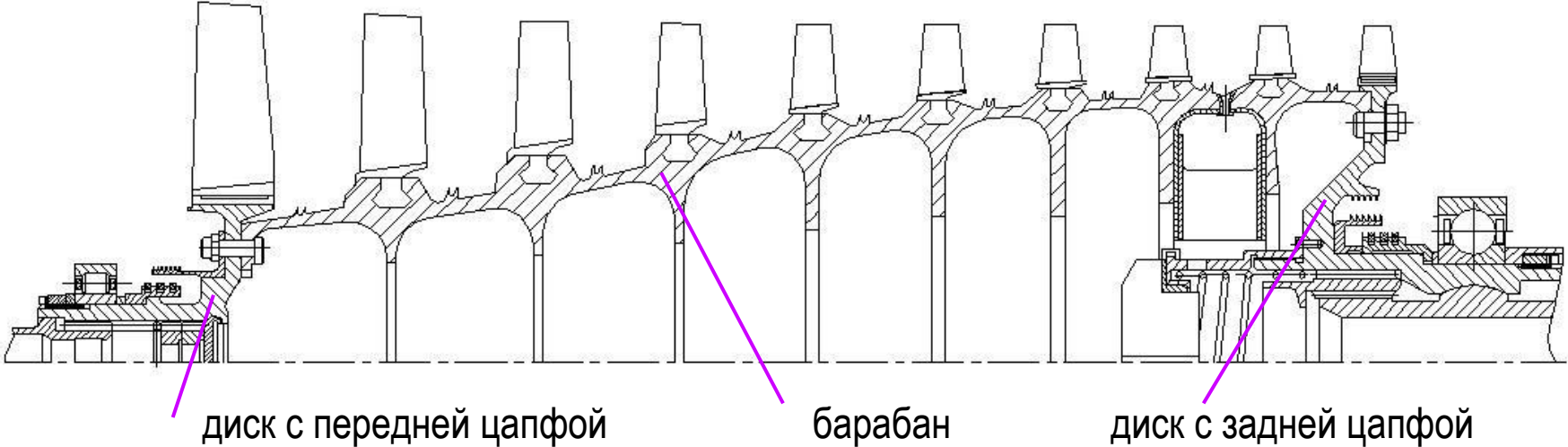


- ⊕ • Высокая изгибная и крутильная жесткость
- Высокая несущая способность

- ⊖ • Сложность сборки и обеспечения соосности
- Большой вес

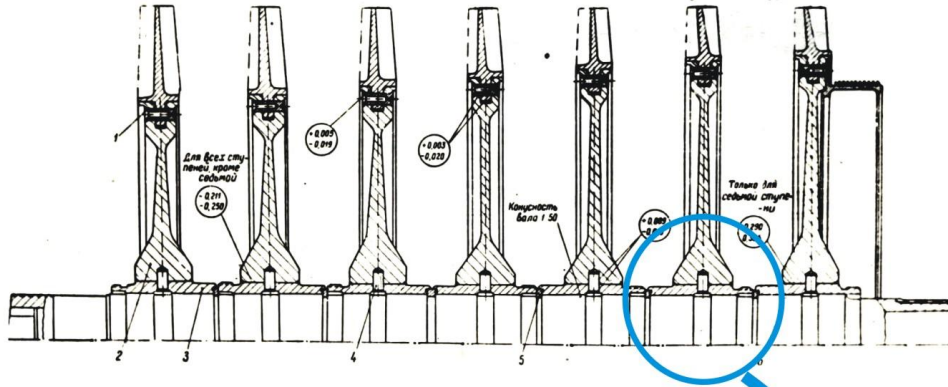
Ротор компрессора барабанного типа

ТВ2-117

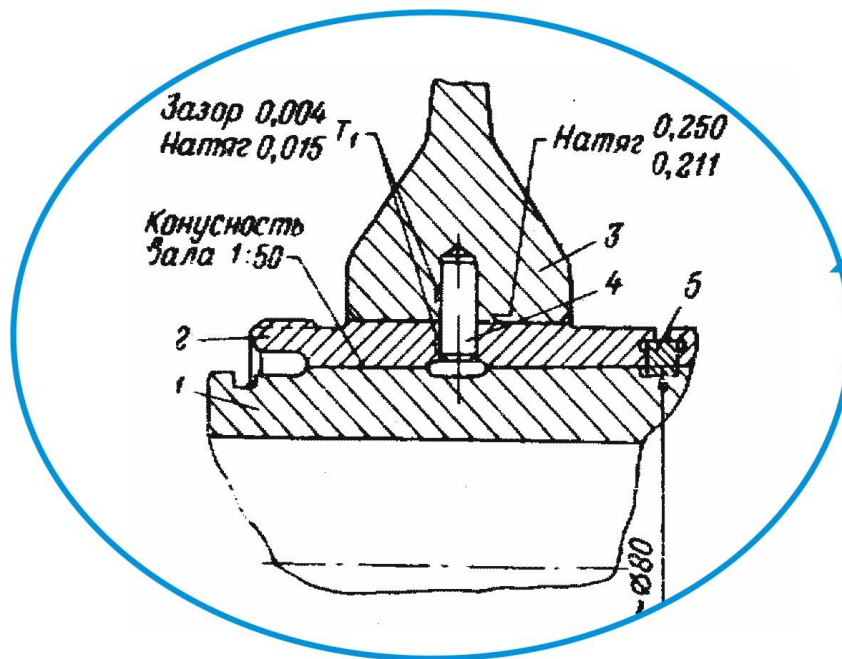


# Ротор компрессора дискового типа

### Посадка дисков на вал с натягом



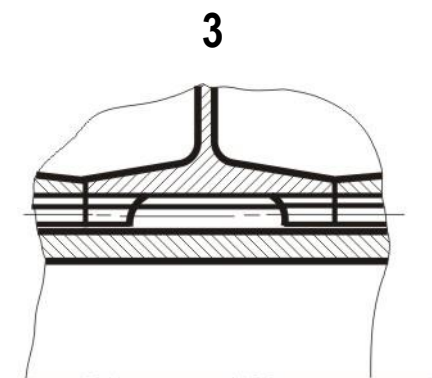
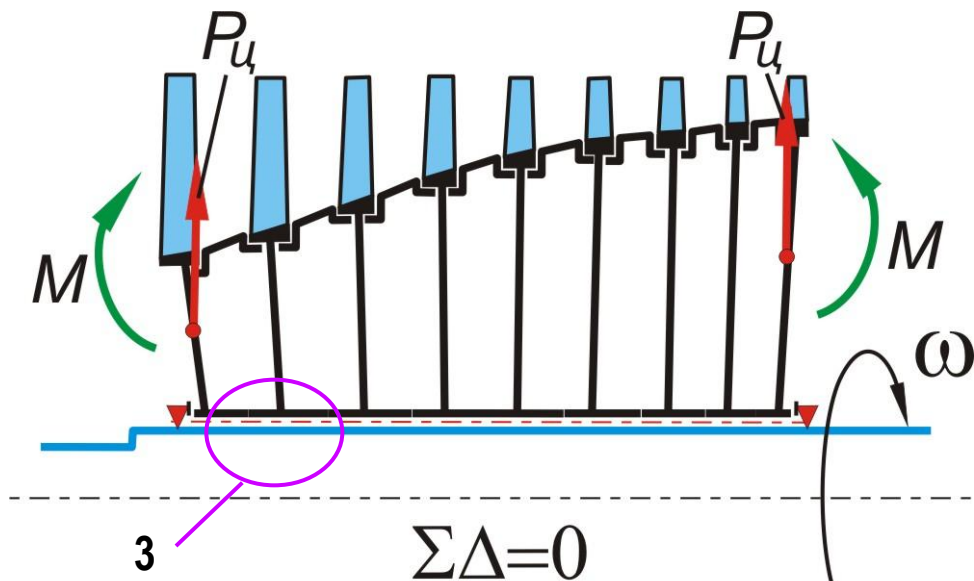
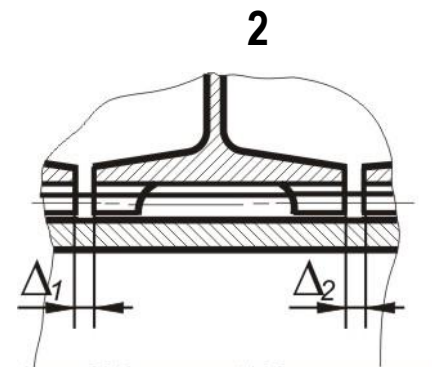
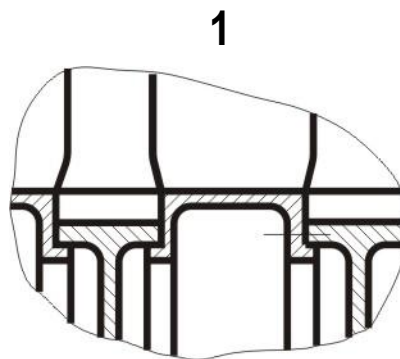
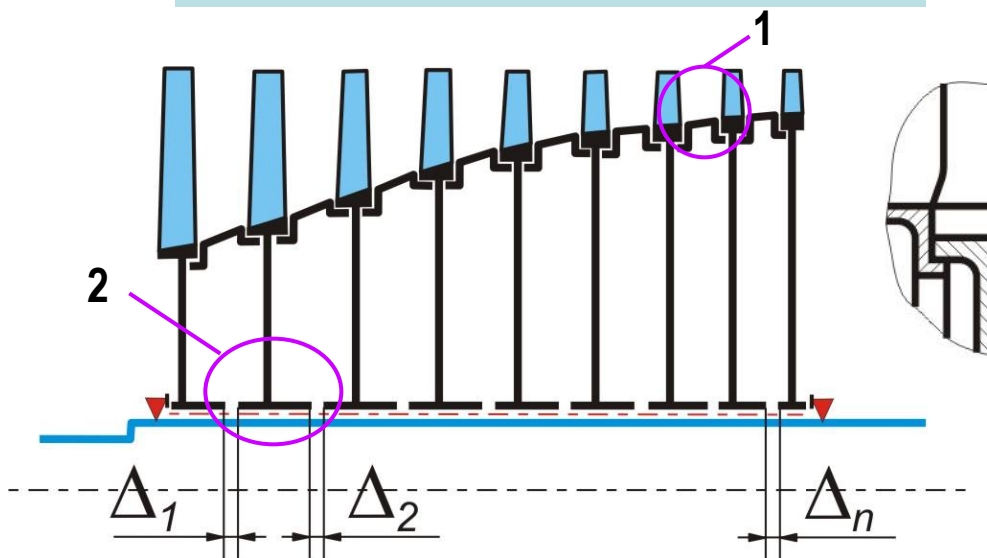
- дополнительное нагружение диска
- опасность распрессовки





# Ротор компрессора дискового типа

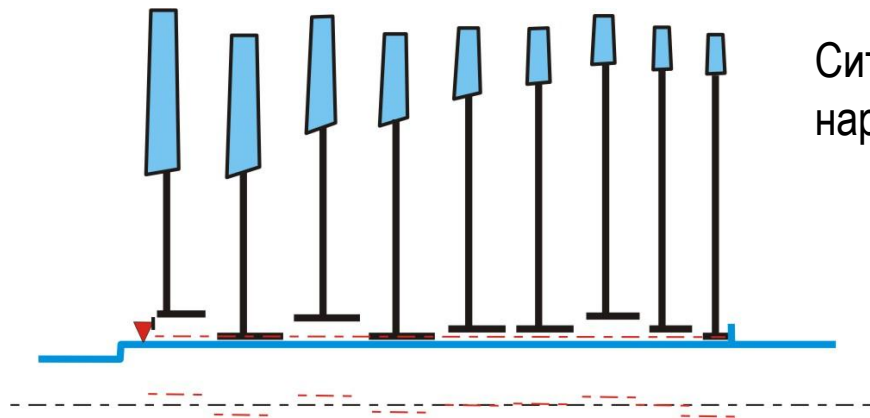
## Шлицевое соединение дисков с валом



# Ротор компрессора дискового типа

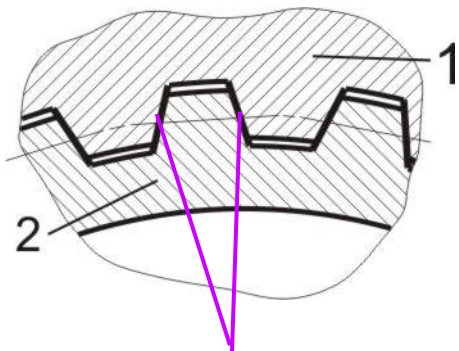
## Шлицевое соединение дисков с валом

### Центрирование дисков с валом по элементам шлицевого соединения



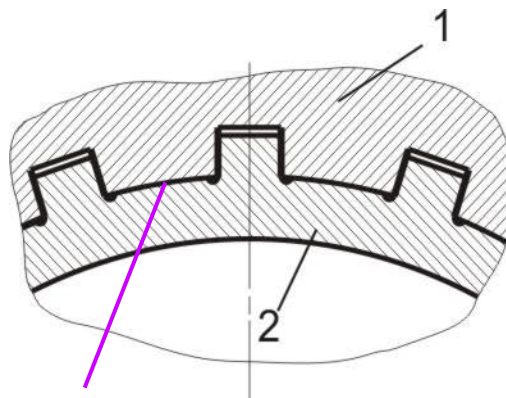
Ситуация, возможная при нарушении центрирования

Эвольвентные шлицы



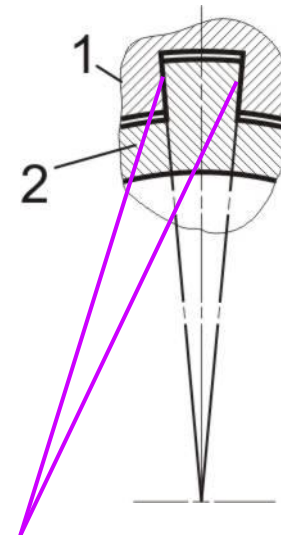
Центрирующая поверхность

Прямоугольные шлицы



Центрирующая поверхность

Трапецевидные шлицы

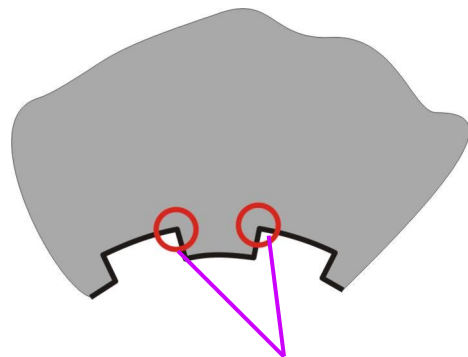
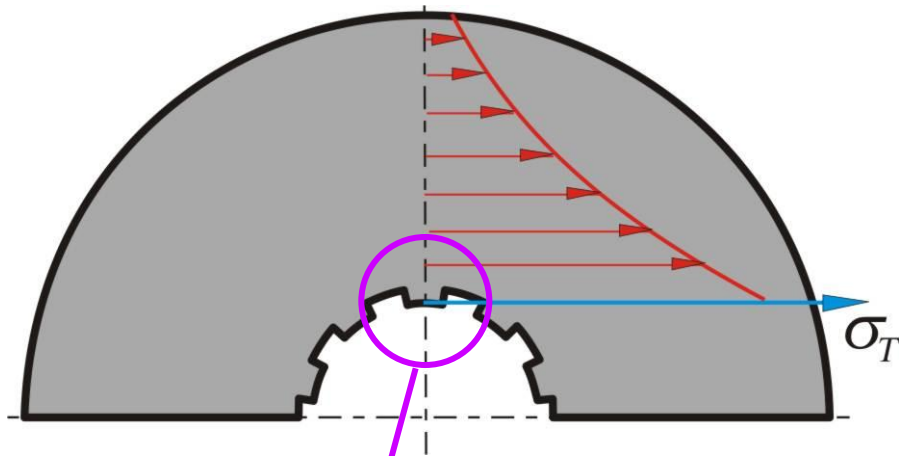


Центрирующая поверхность

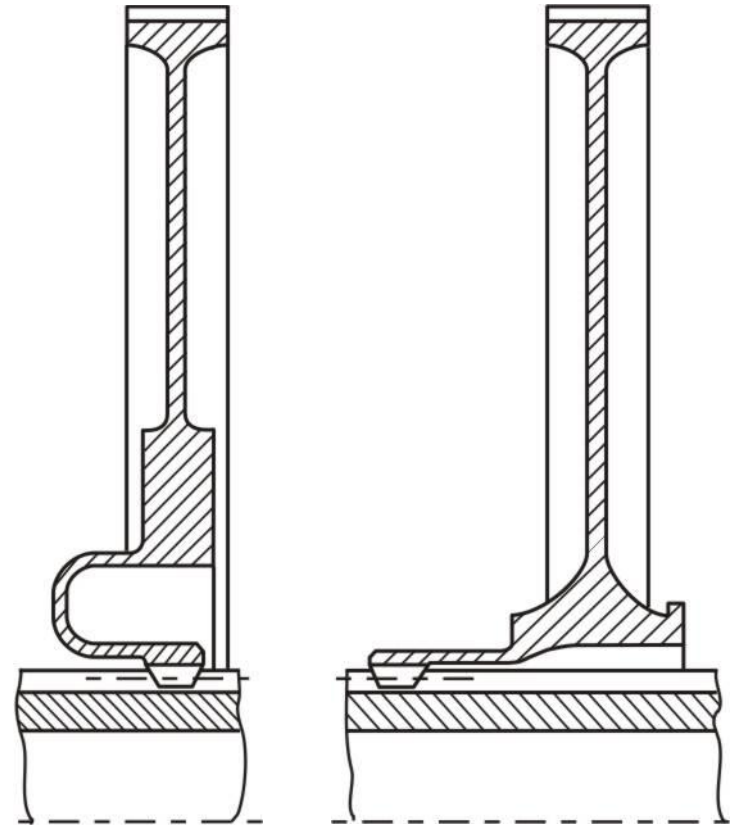
# Ротор компрессора дискового типа

Шлицевое соединение дисков с валом

Выносные шлицевые венцы



Зоны концентрации напряжений

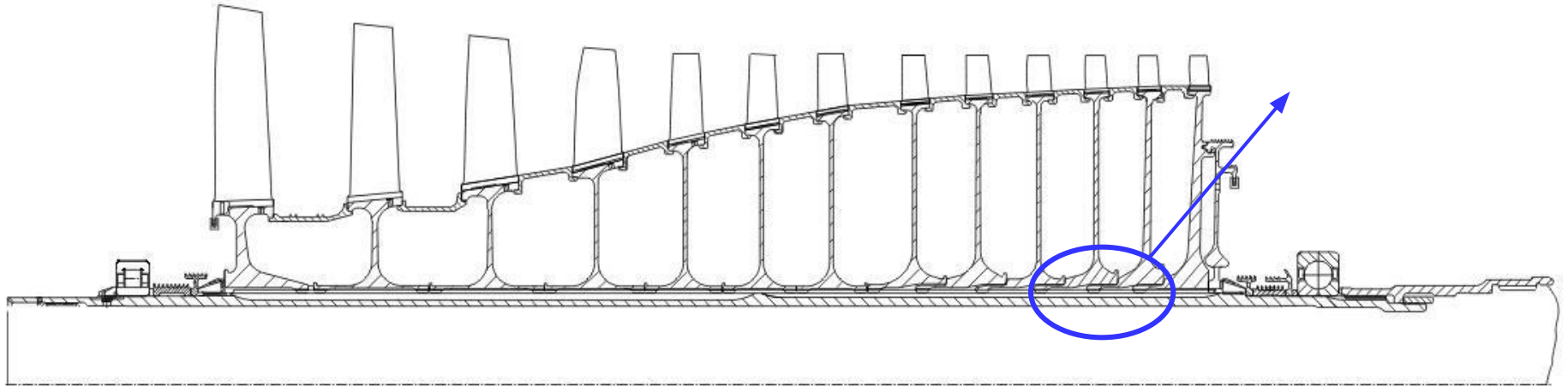
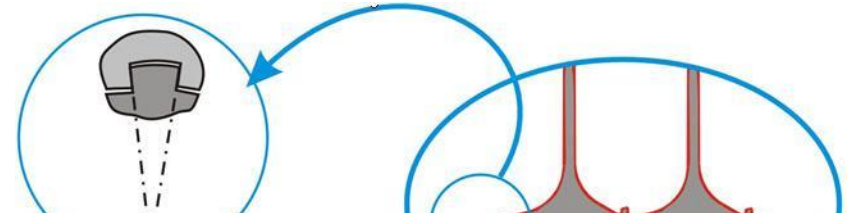


# Ротор компрессора дискового типа

## Роторы осевых компрессоров

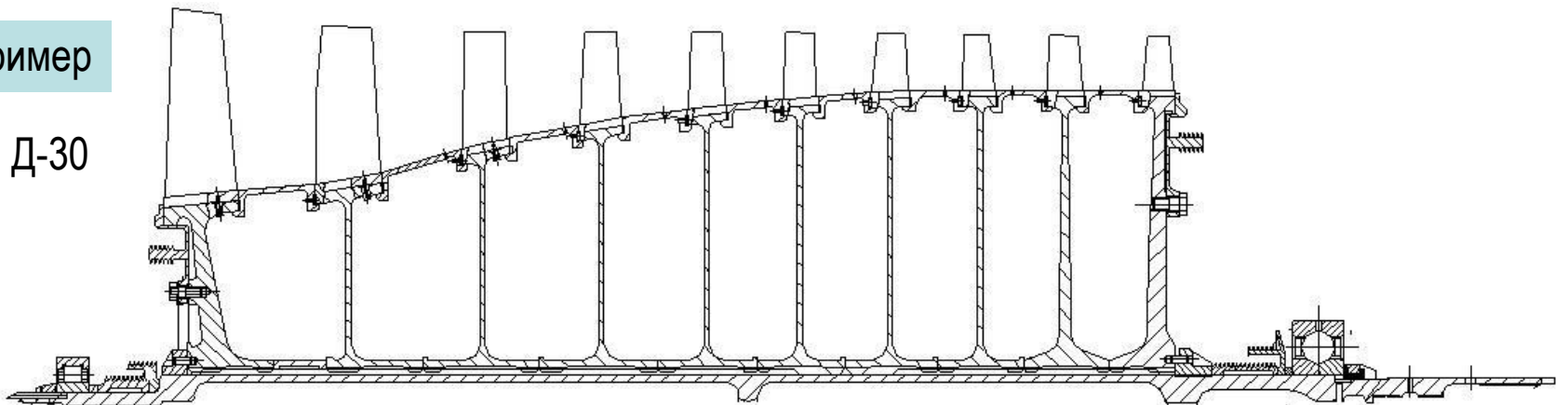
Пример

КВД ПС-90А



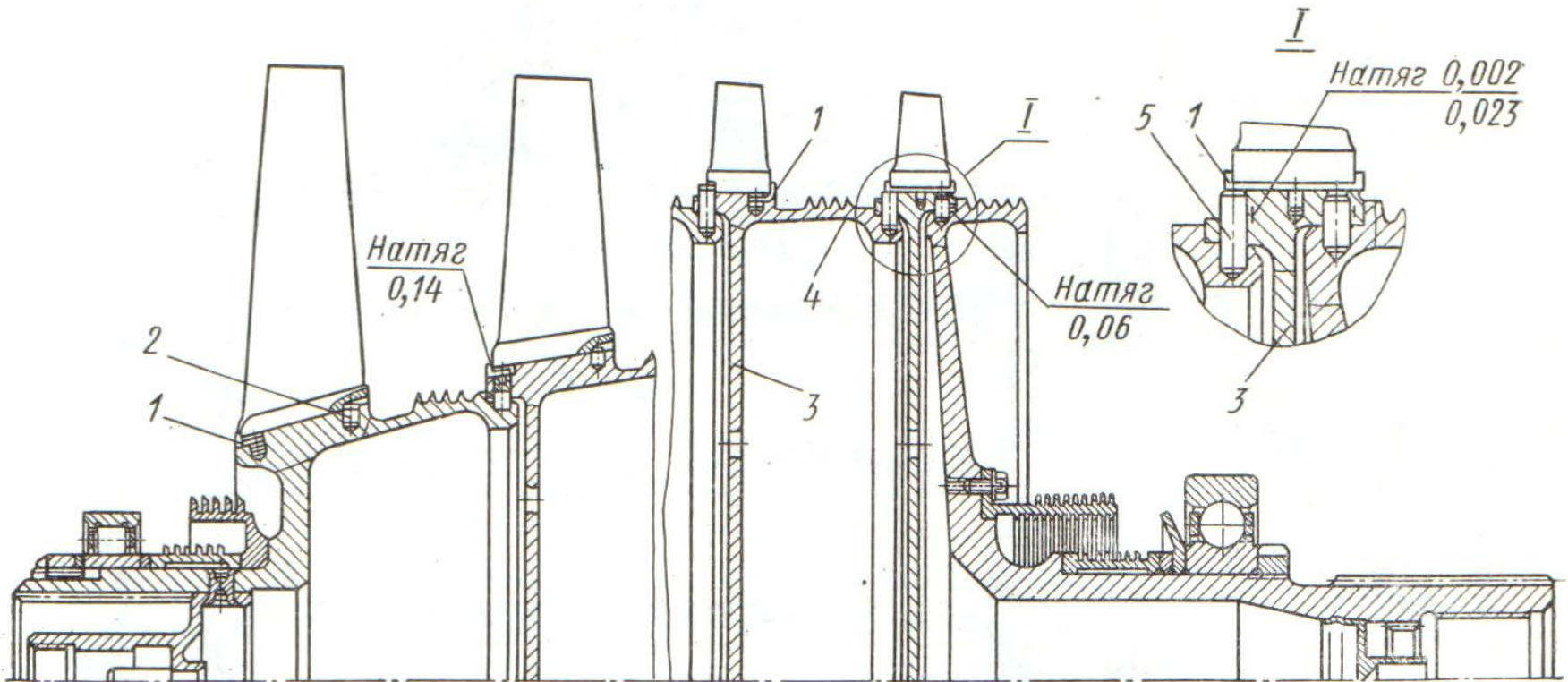
Пример

КВД Д-30



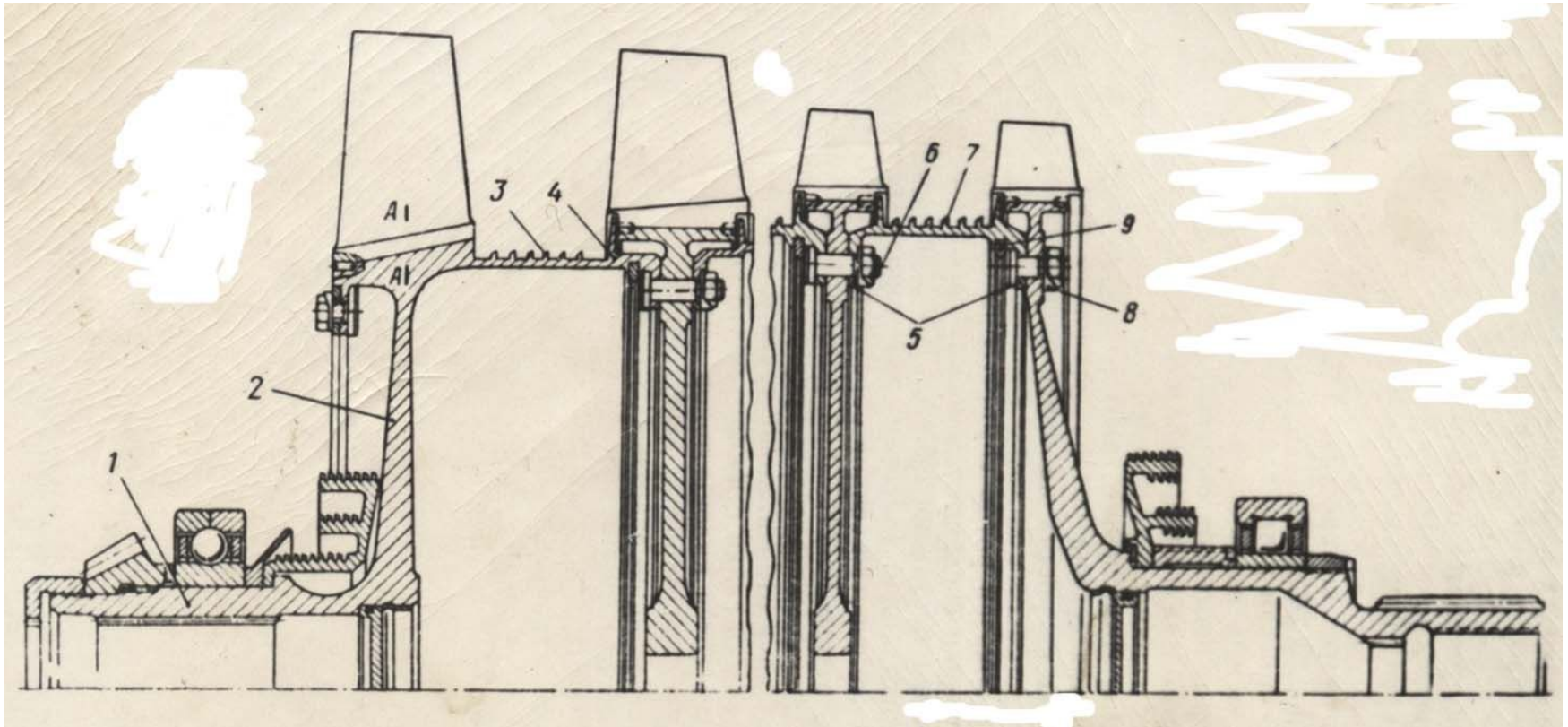
# Ротор компрессора барабанно-дискового типа

Соединение секций с натягом и фиксацией радиальными штифтами



## Ротор компрессора барабанно-дискового типа

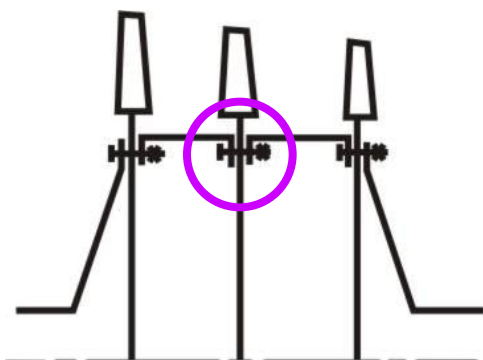
Фланцевое соединение секций



много крепежных деталей, сложная сборка

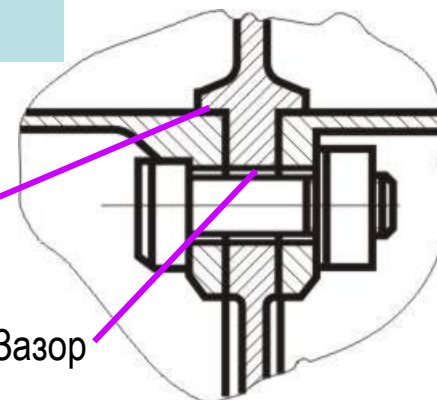
## Ротор компрессора барабанно-дискового типа

### Центрирование элементов ротора при фланцевом соединении секций



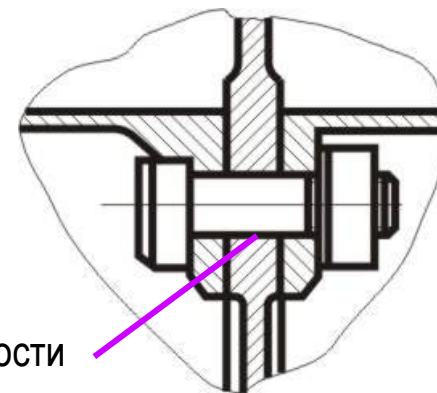
Центрирование по цилиндрическим поверхностям

Точно выполненные цилиндрические поверхности обеих деталей



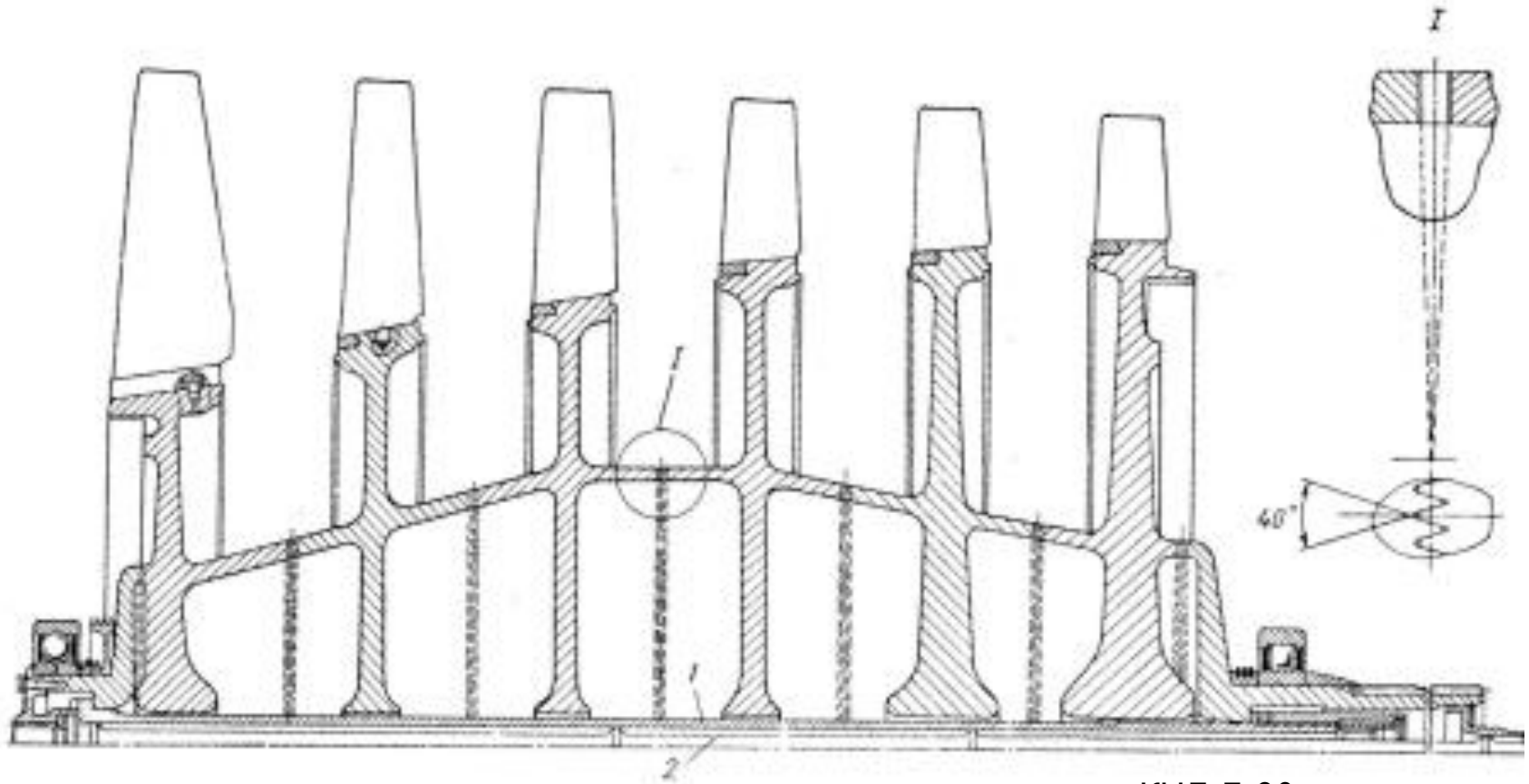
Центрирование по призонным болтам или штифтам

Точно выполненные цилиндрические поверхности всех деталей



## Ротор компрессора барабанно-дискового типа

Соединение дисков при помощи торцевых шлиц с центральным стяжным болтом



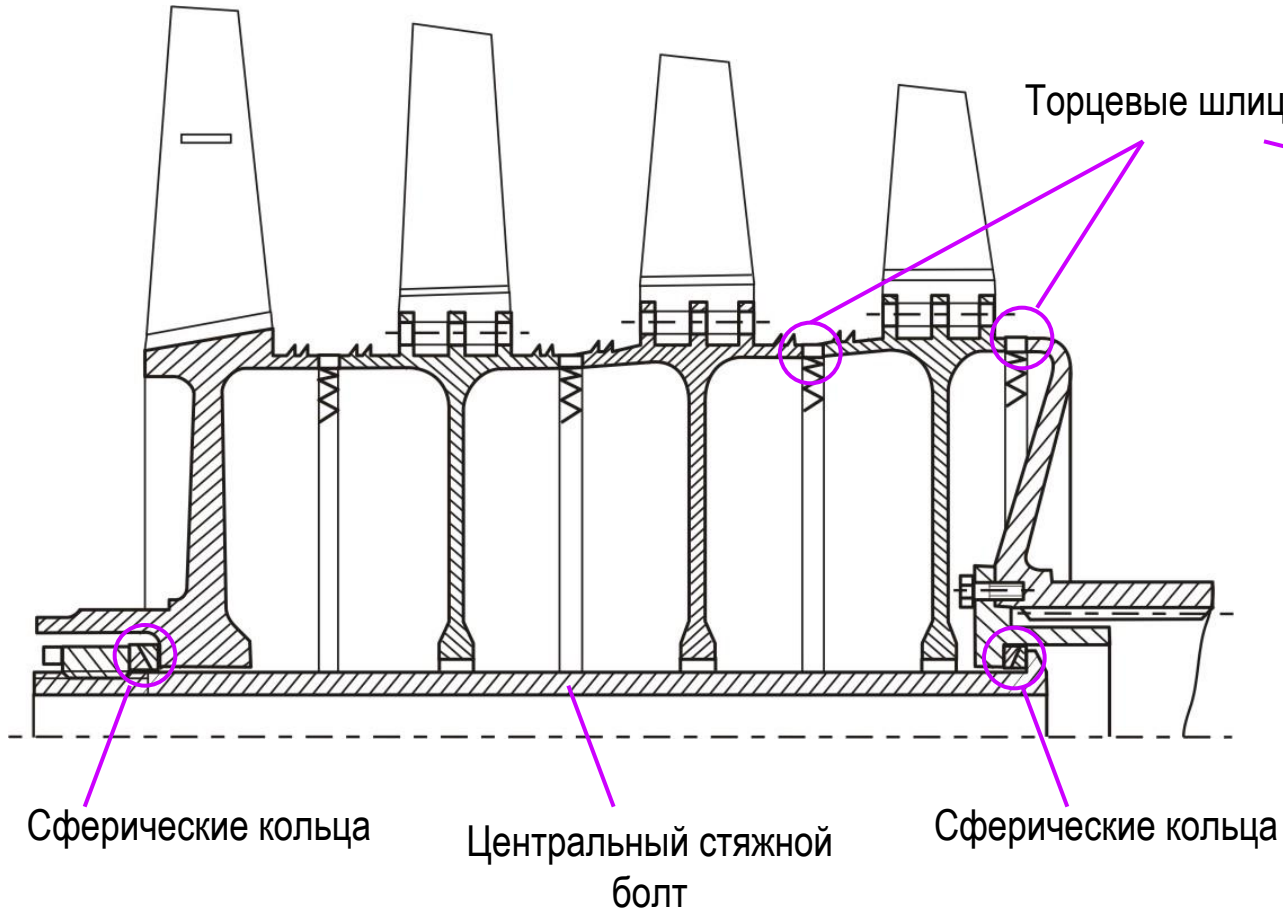
⊕ простота, надежность

КНД Д-30

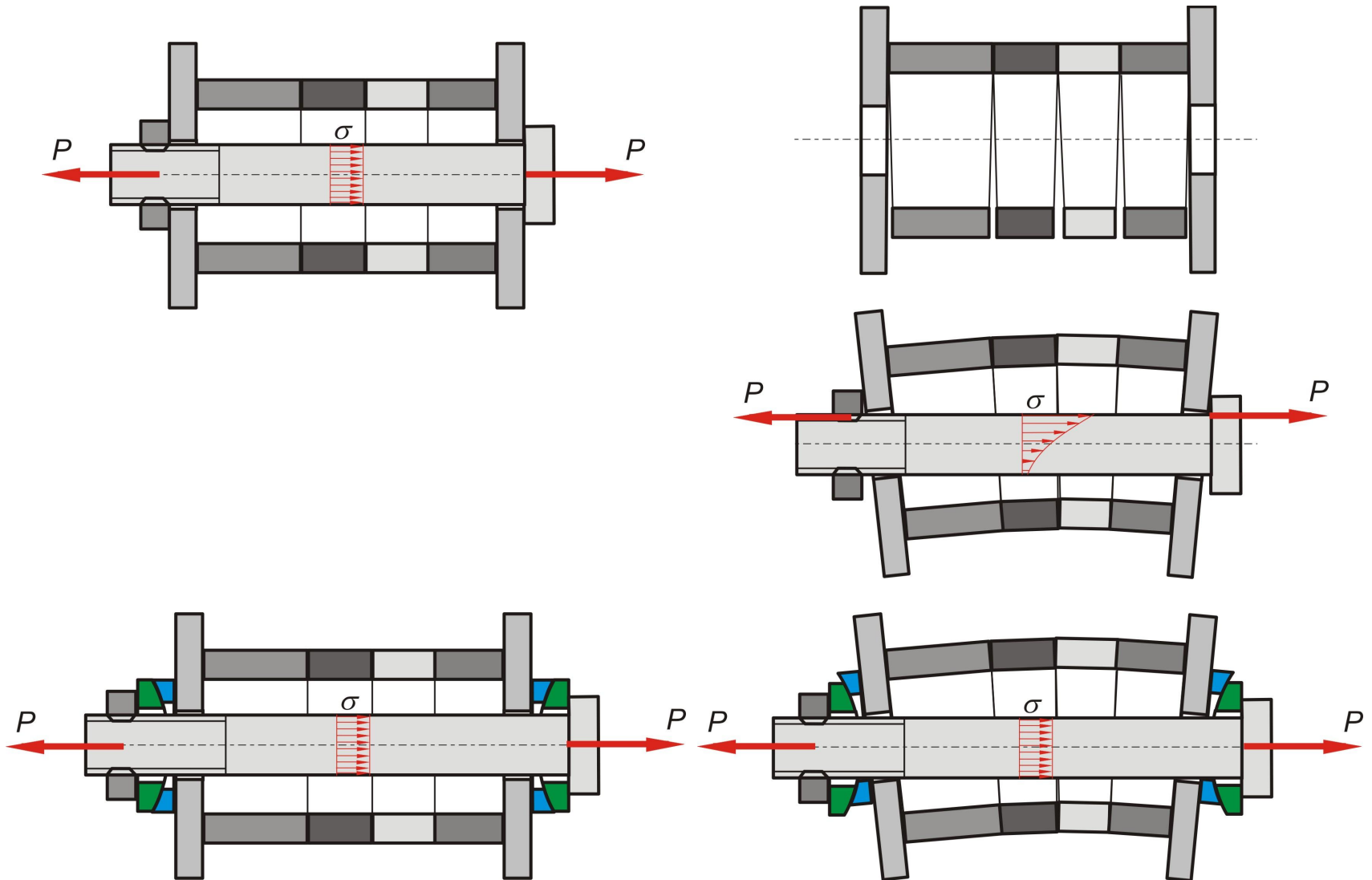


## Ротор компрессора барабанно-дискового типа

Соединение дисков при помощи торцевых шлиц с центральным стяжным болтом

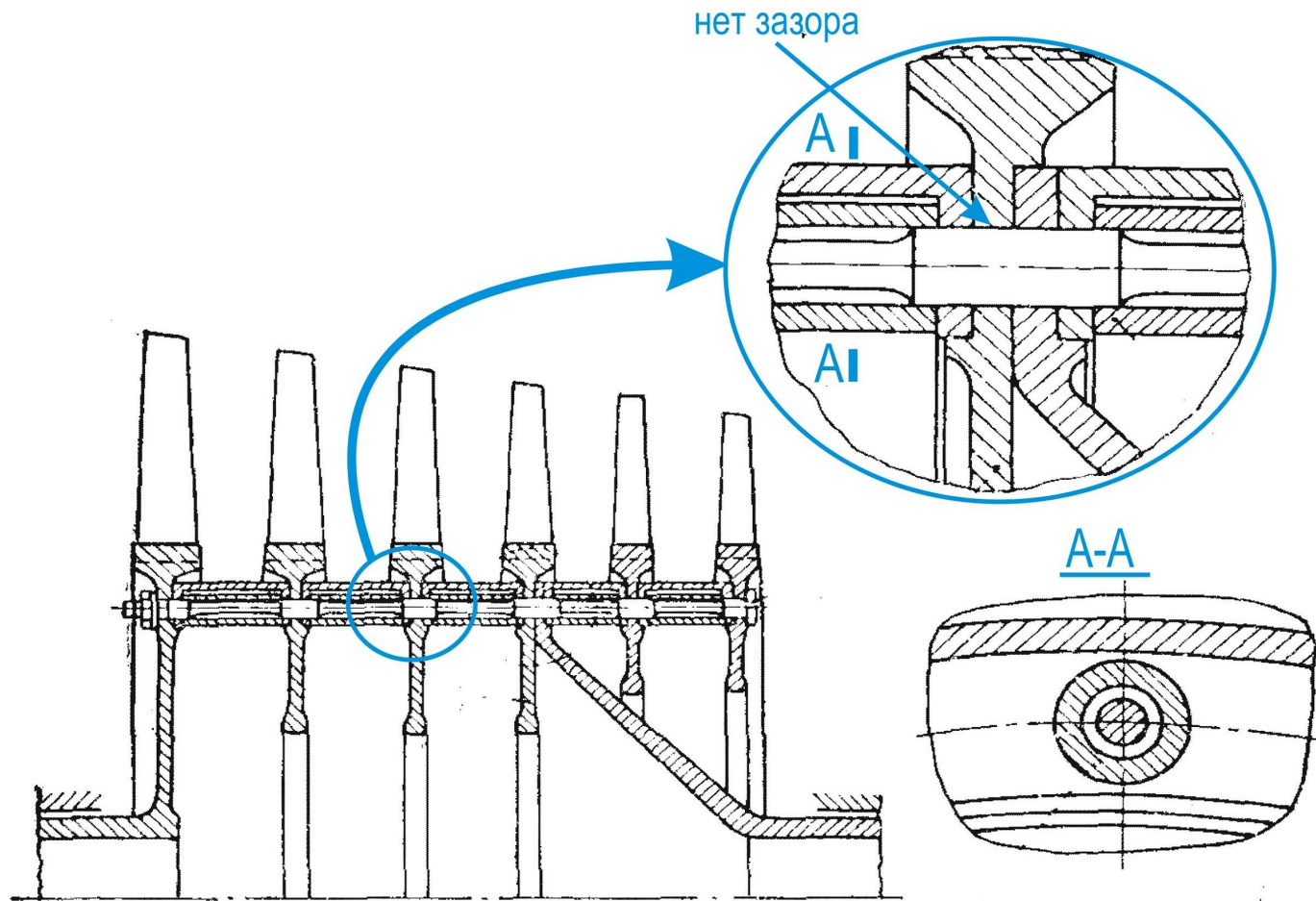


Внецентренное растяжение стяжного болта и его устранение



# Ротор компрессора барабанно-дискового типа

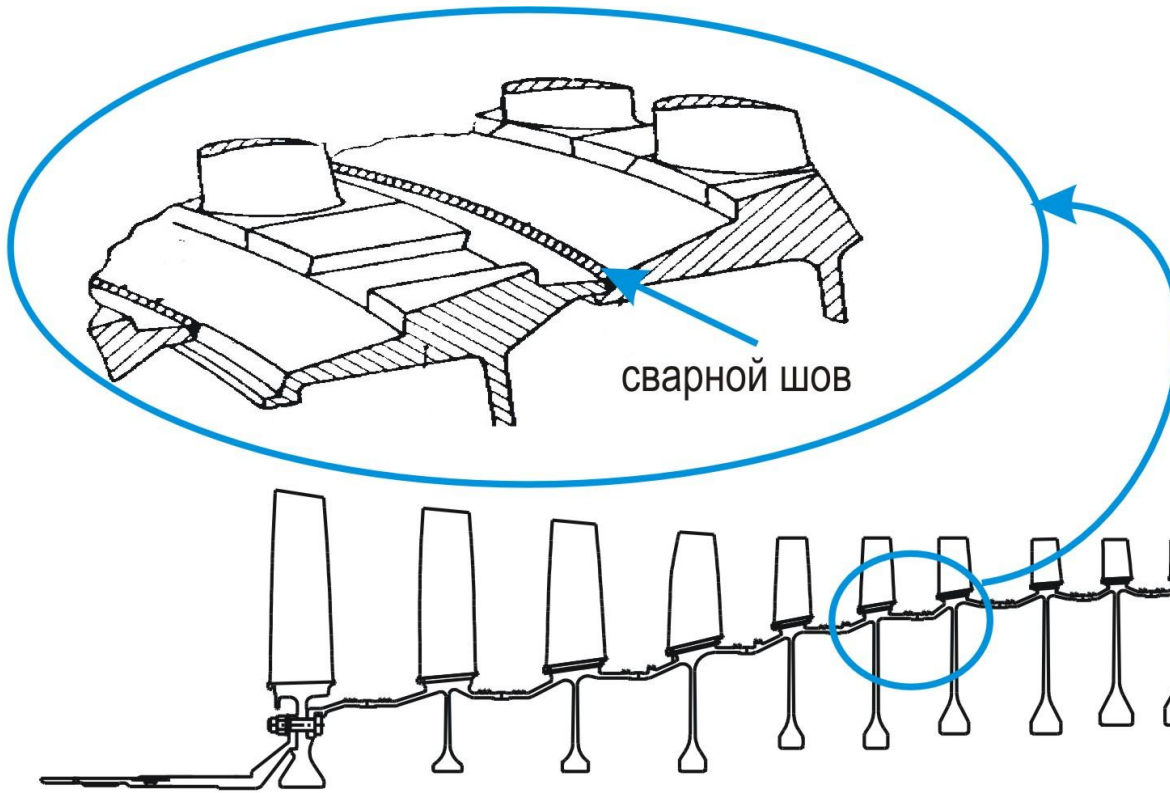
Соединение дисков периферийными стяжными болтами



⊖ сложная сборка

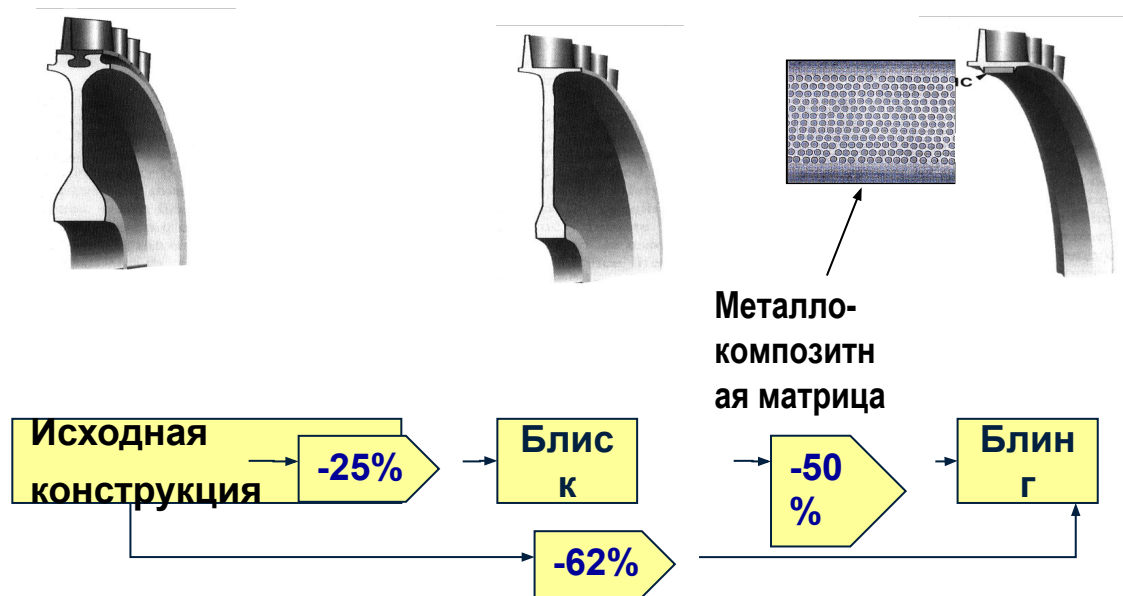
# Ротор компрессора барабанно-дискового типа

Сварное соединение дисков



Технология сварки ?

# Перспективные конструкции рабочих колес осевых компрессоров



Моноколесо осевого компрессора



- Снижение массы
- Отсутствие замкового соединения

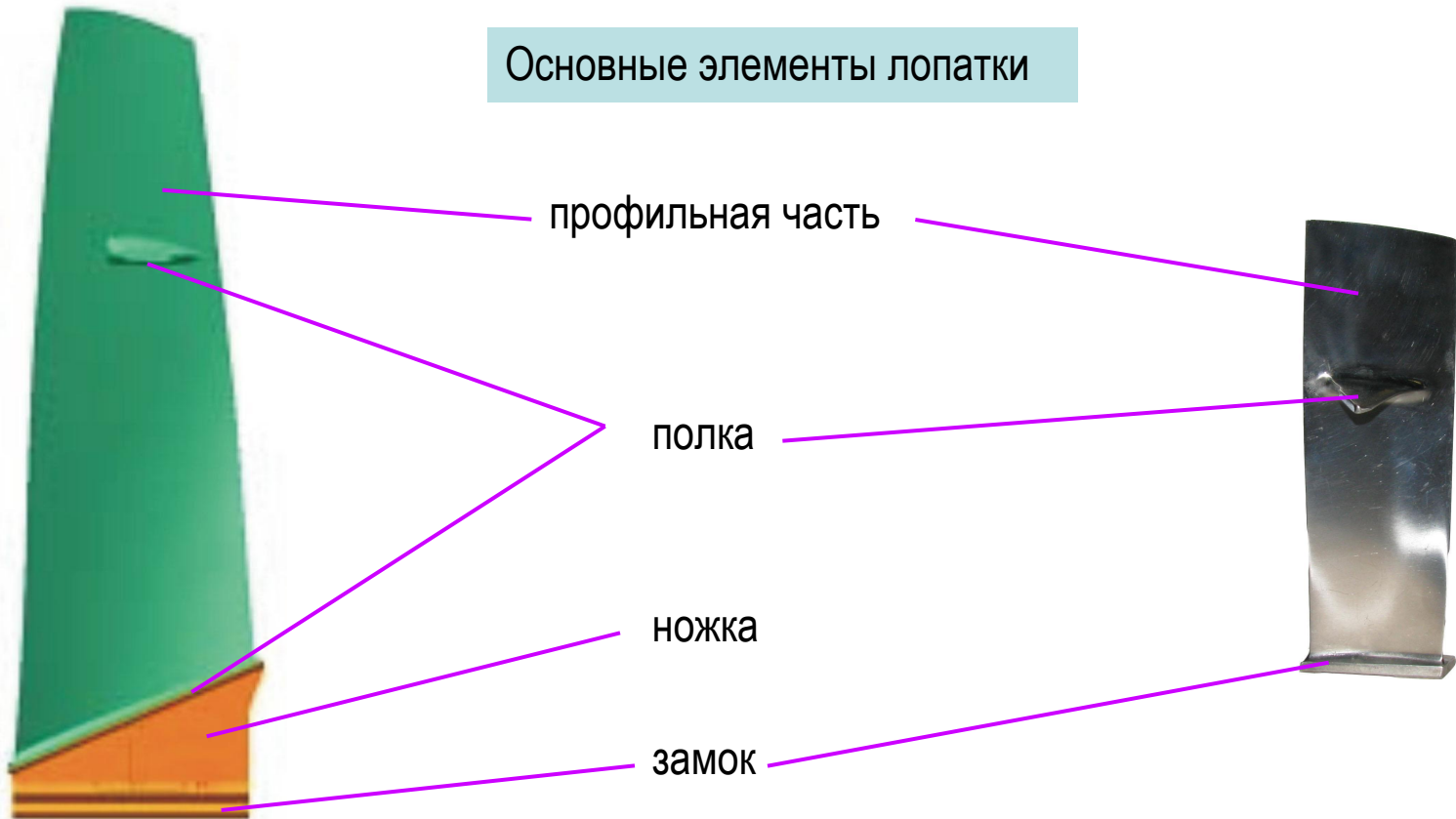


- Технология изготовления
- Технология ремонта

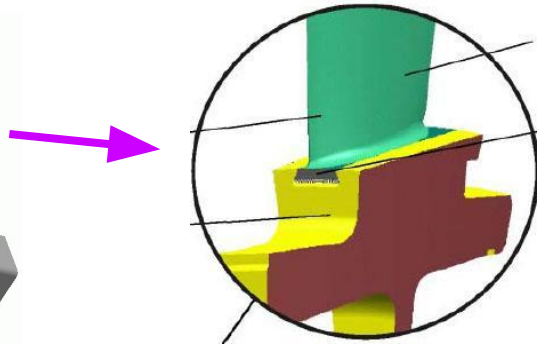
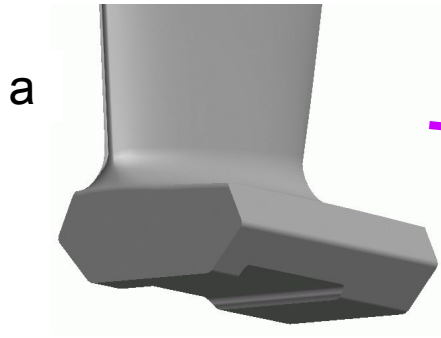
## Требования к лопаткам

- высокая прочность и жесткость;
- простота установки в колесо;
- высокая точность линейных и угловых размеров;
- высокая чистота поверхности пера

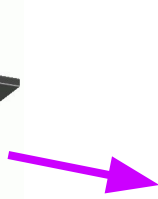
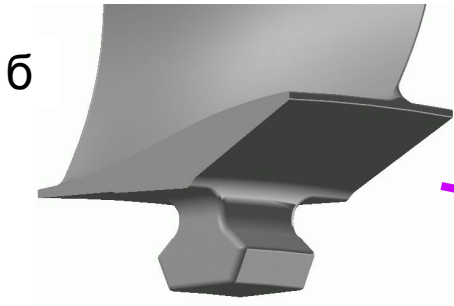
### Основные элементы лопатки



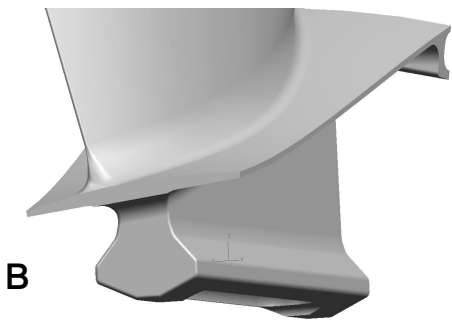
## Замок типа «ласточкин хвост»



- а) с плоскими рабочими поверхностями
- б) с кольцевыми рабочими поверхностями
- в) с плоскими рабочими поверхностями на ножке



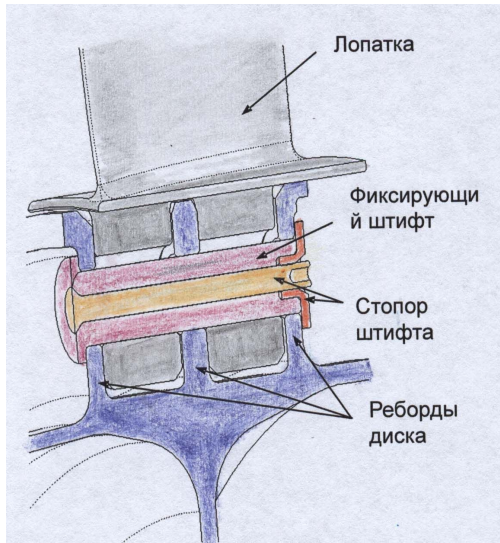
- ⊕ - простота изготовления
- ⊖ - большие окружные размеры  
- применим для легких лопаток



## Шарнирное крепление



- ⊕ снижение вибраций и напряжений изгиба
- ⊖ •низкая прочность замка
- большие габариты
- большая масса



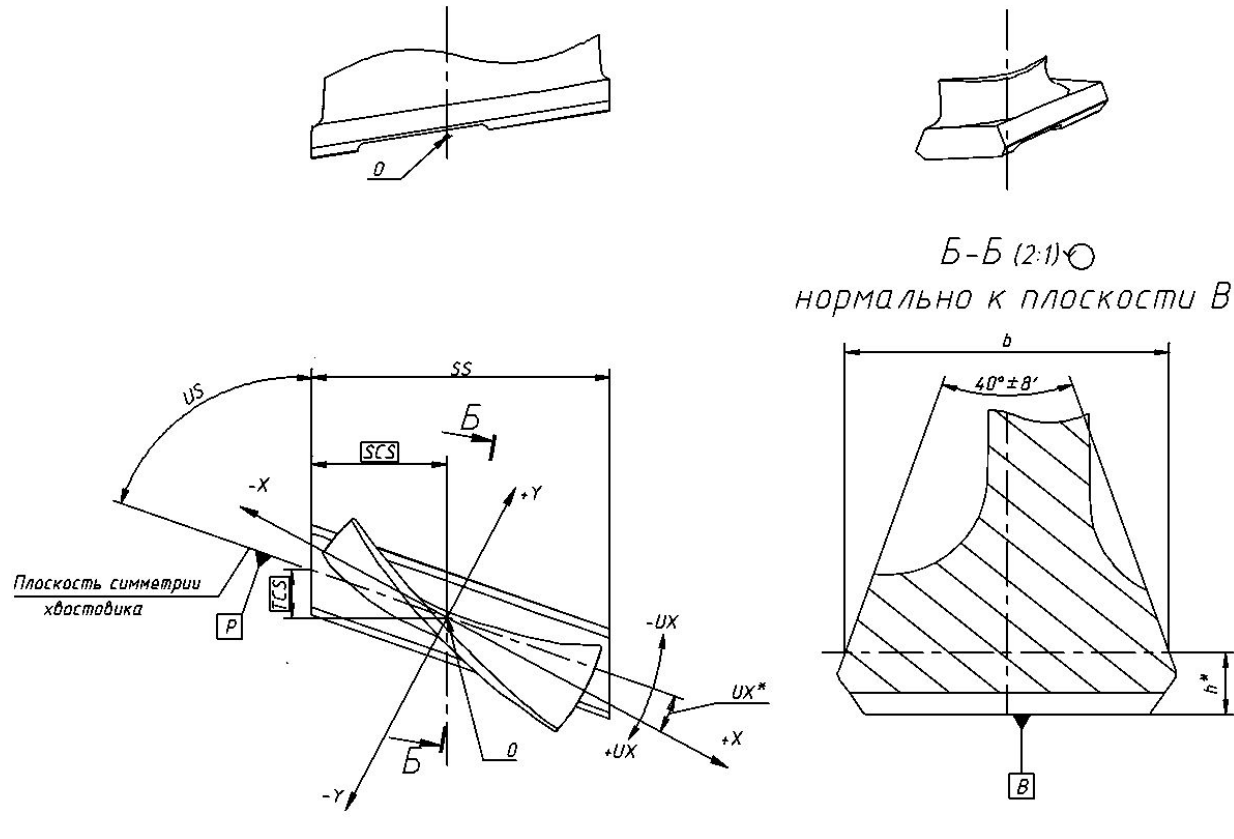
## Замок елочного типа



- ⊕ - высокая нагрузочная способность
- минимальные окружные размеры
- ⊖ - требуется высокая точность изготовления

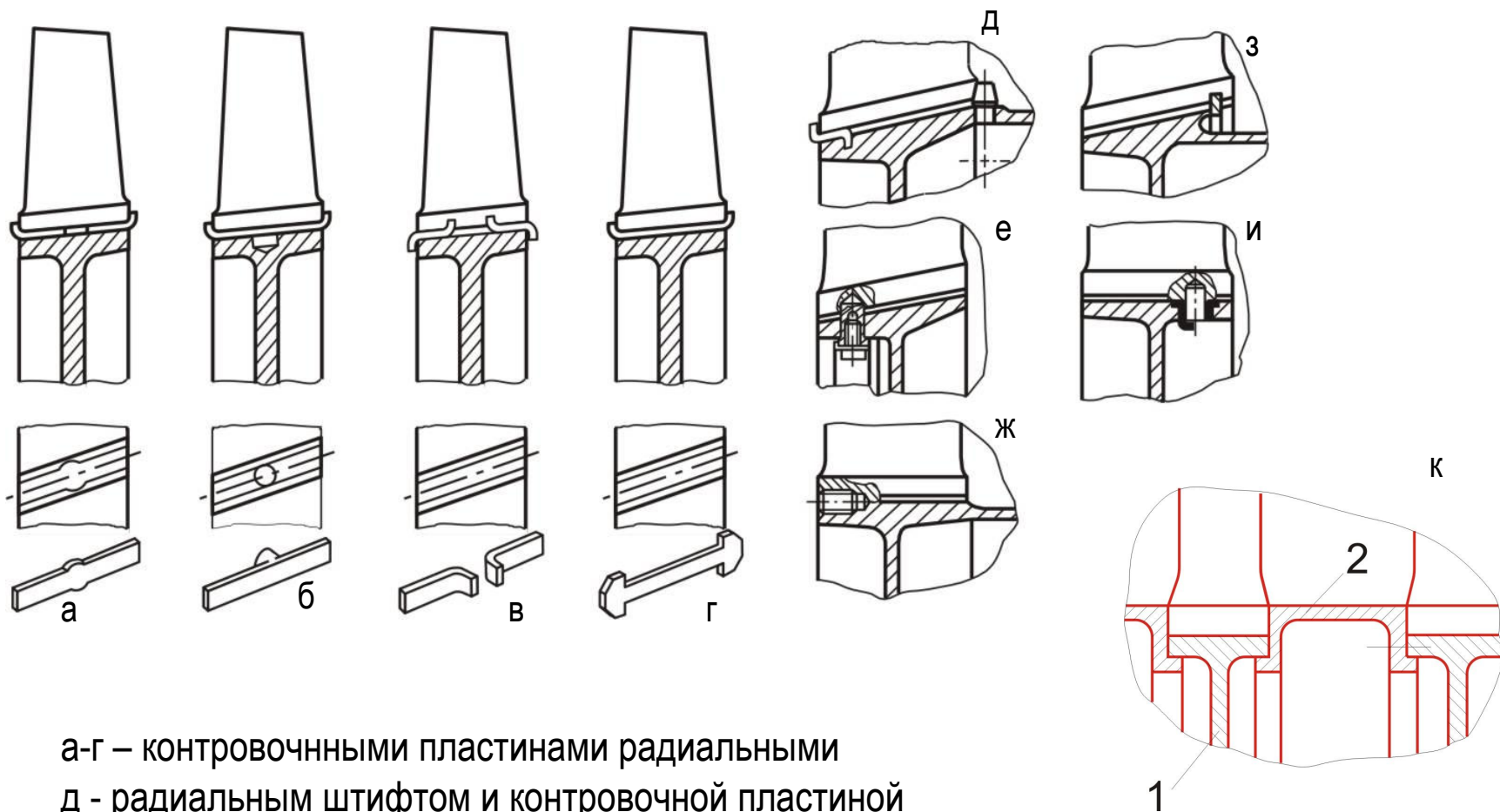


Замок типа «ласточкин хвост» с плоскими рабочими поверхностями



## Крепление рабочих лопаток осевых компрессоров

Фиксация лопаток от перемещений в продольных пазах



а-г – контрольными пластинами радиальными

д - радиальным штифтом и контрольной пластиной

е, и – радиальными штифтами

ж - осевыми резьбовыми штифтами

з – разжимными кольцами

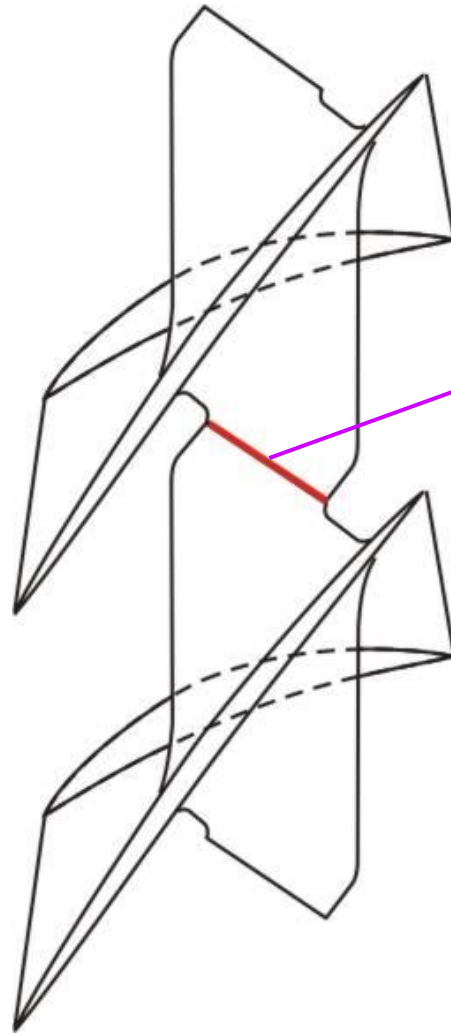
к – соседними сопрягаемыми деталями

# Крепление рабочих лопаток осевых компрессоров

## Фиксация лопаток от перемещений в кольцевых пазах



## Контактные поверхности бандажных полок в бандажном кольце



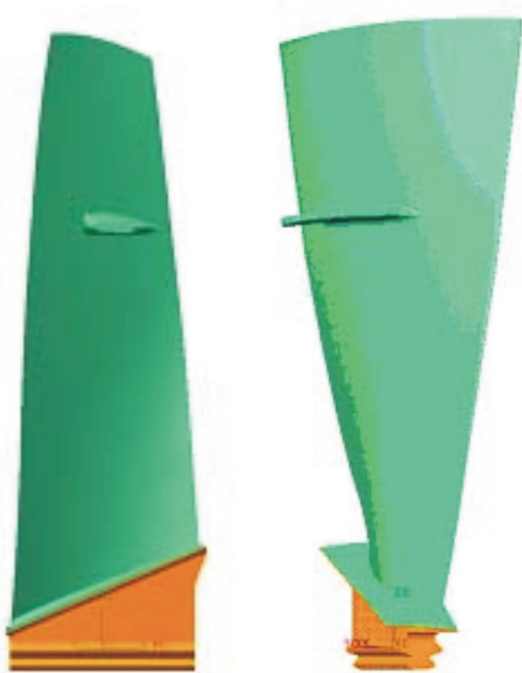
контактная поверхность  
бандажных полок  
препятствует раскрутке  
лопатки

## Особенности крупногабаритных лопаток вентиляторов

### Крупногабаритные рабочие лопатки вентилятора

Основная проблемы:

- сложная геометрия
- масса
- вибрации

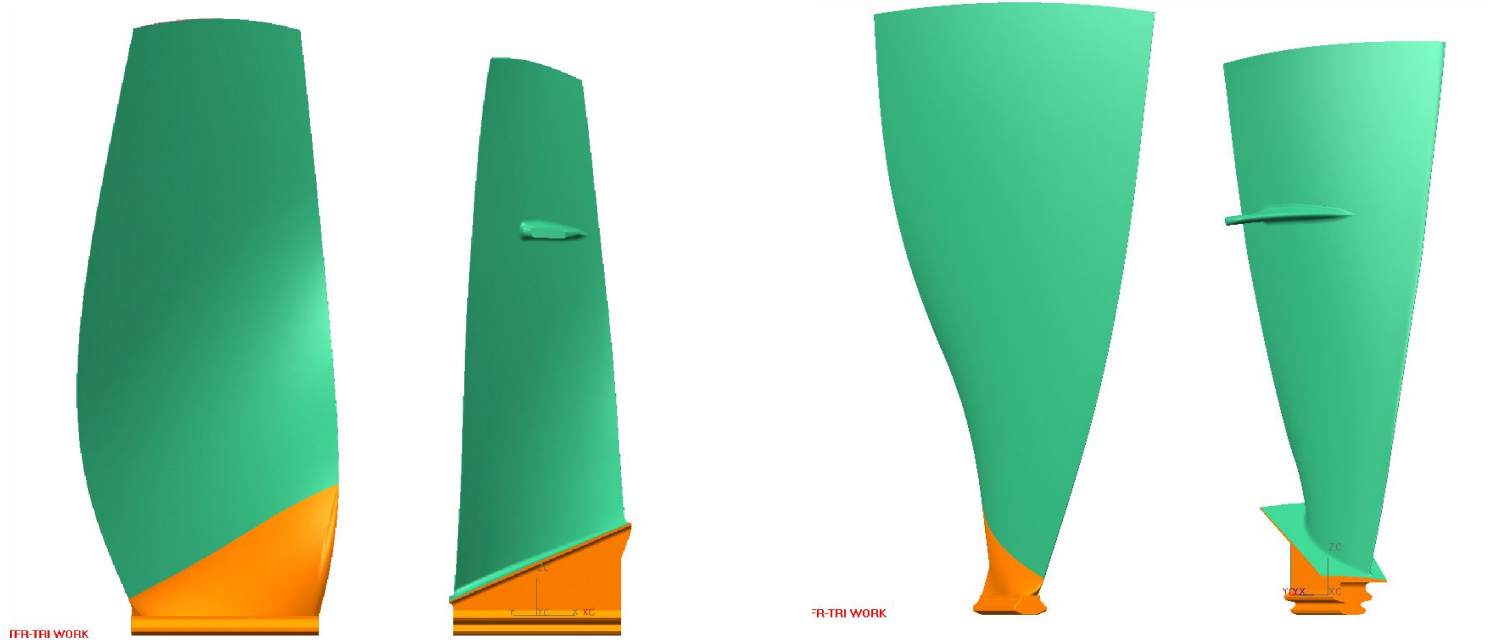


лопатка с антивибрационной полкой



лопатки с антивибрационными полками на двух уровнях.

## Широкохордные лопатки вентилятотров



широкохордная лопатка вентилятора в сравнении с полочной



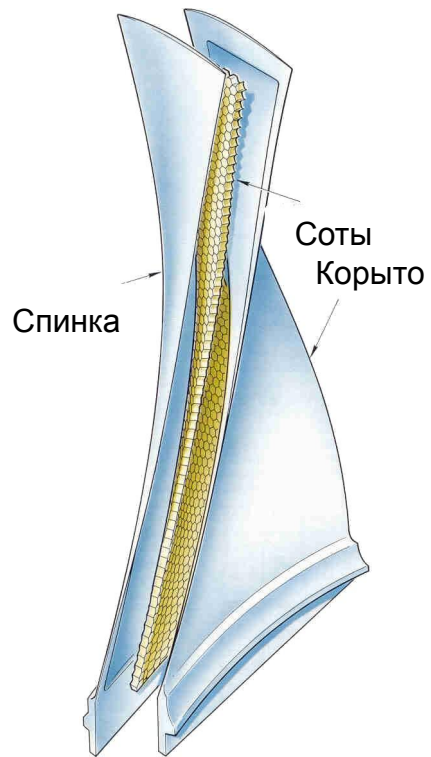
- снижение потерь
- уменьшение кол-ва лопаток
- уменьшение веса
- увеличение жесткости
- снижение повреждаемости



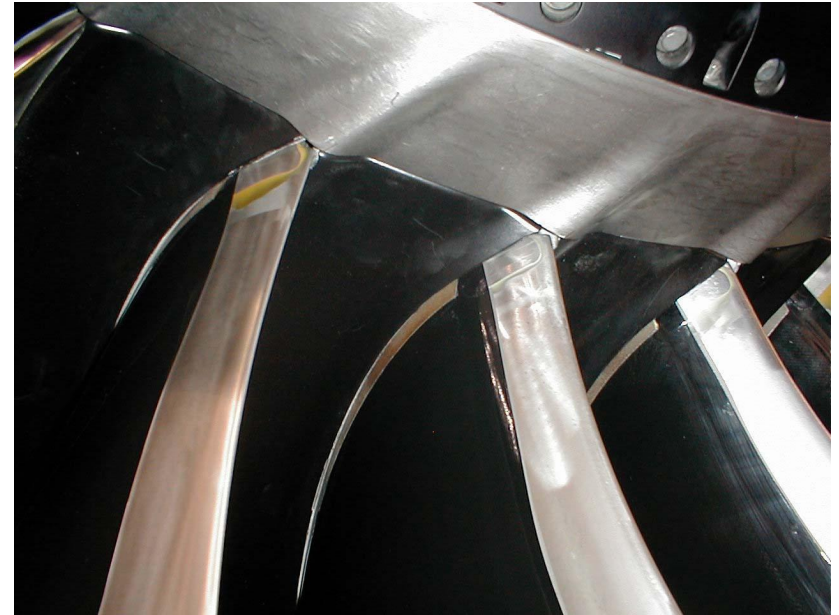
- вибрации (сложность и многообразие собственных форм)
- технология ?

## Особенности крупногабаритных лопаток вентиляторов

Пример исполнения полай титановой лопатки с сотовым наполнителем  
( двигатель RB-211)



## Пример широкохордных лопаток из композиционных материалов



лопатка из углепластика с титановой входной кромкой (JE-90)



- снижение веса
- демпфирование колебаний
- стойкость к повреждениям
- безопасность при обрыве



• технология ?



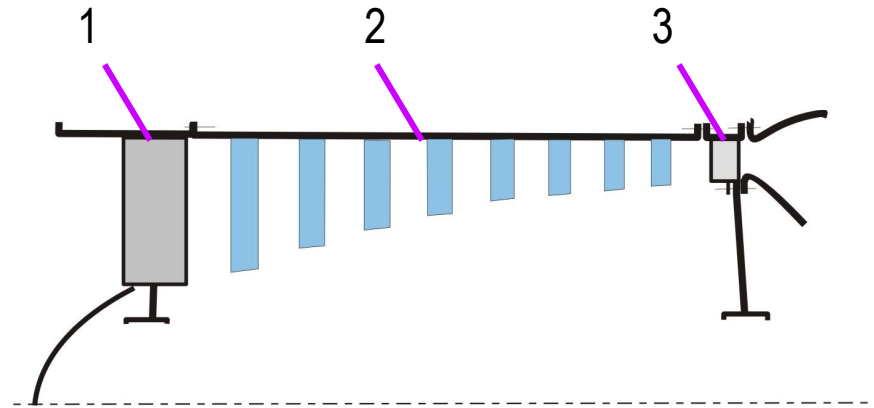
# Корпусы осевых компрессоров

### нагрузки:

- вес и силы инерции ротора
- внутреннее давление
- осевые силы, изг. крутящие моменты
- нагрев

### требования:

- герметичность;
- прочность и жесткость
- минимальный вес
- простота изготовления, монтажа НА
- эксплуатационная технологичность
- локализация возможного разрушения лопаток
- обеспечение минимальных радиальных зазоров



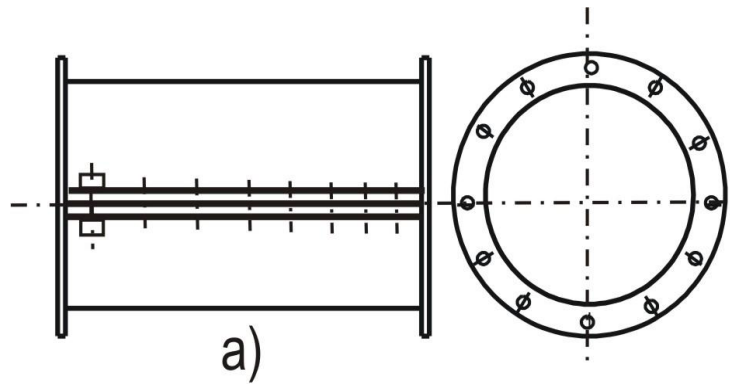
### Корпус компрессора состоит из узлов:

- 1 - передний корпус(с узлом опоры);
- 2 - средний корпус с неподвижными и поворотными НА;
- 3 – задний корпус (узлом опоры);

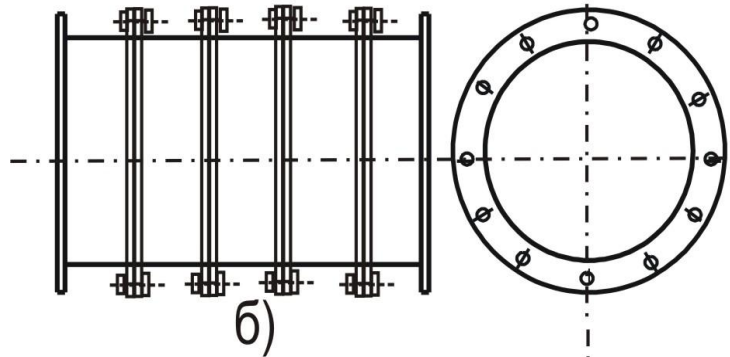
### могут быть:

- корпус отборов;
- корпус перепусков;
- корпус ВНА

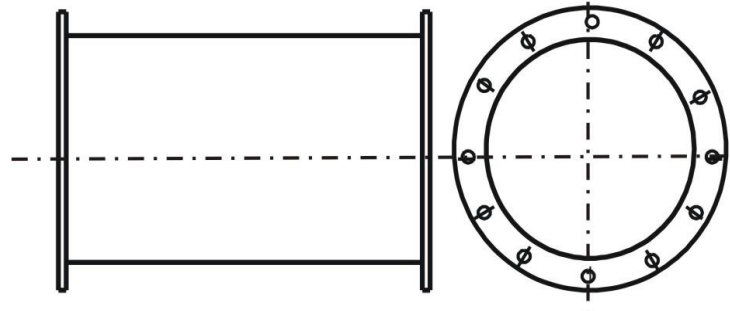
## Типы корпусов



а)



б)



в)

### *С разрезами в меридиональной плоскости*

⊕ удобство сборки

⊖ «овализация»

### *С поперечными разрезами*

⊕ удобство сборки

⊖ •СЛОЖНОСТЬ

•ВЕС

### *Без разрезов*

⊕ •мин.зазоры

•высокий КПД

•снижение веса

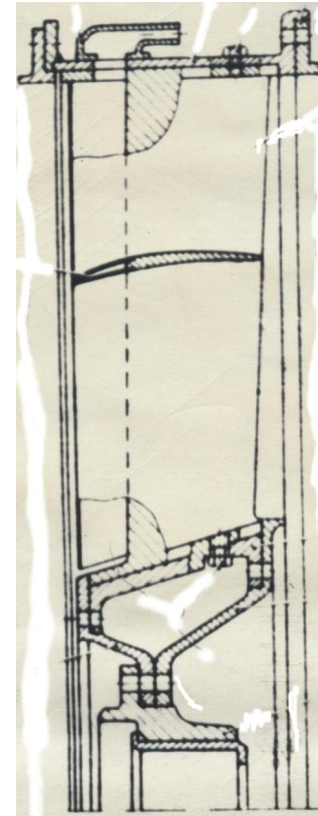
⊖ сложность сборки

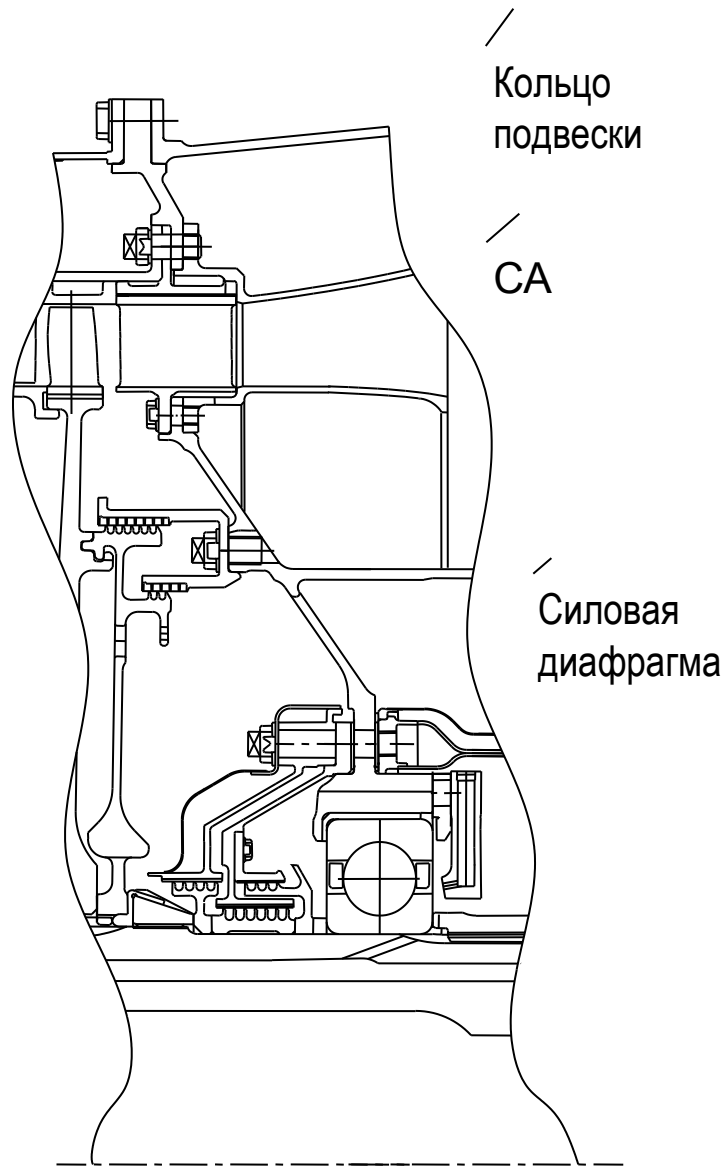
## Передний корпус с узлом передней опоры

силовые  
лопатки ВНА



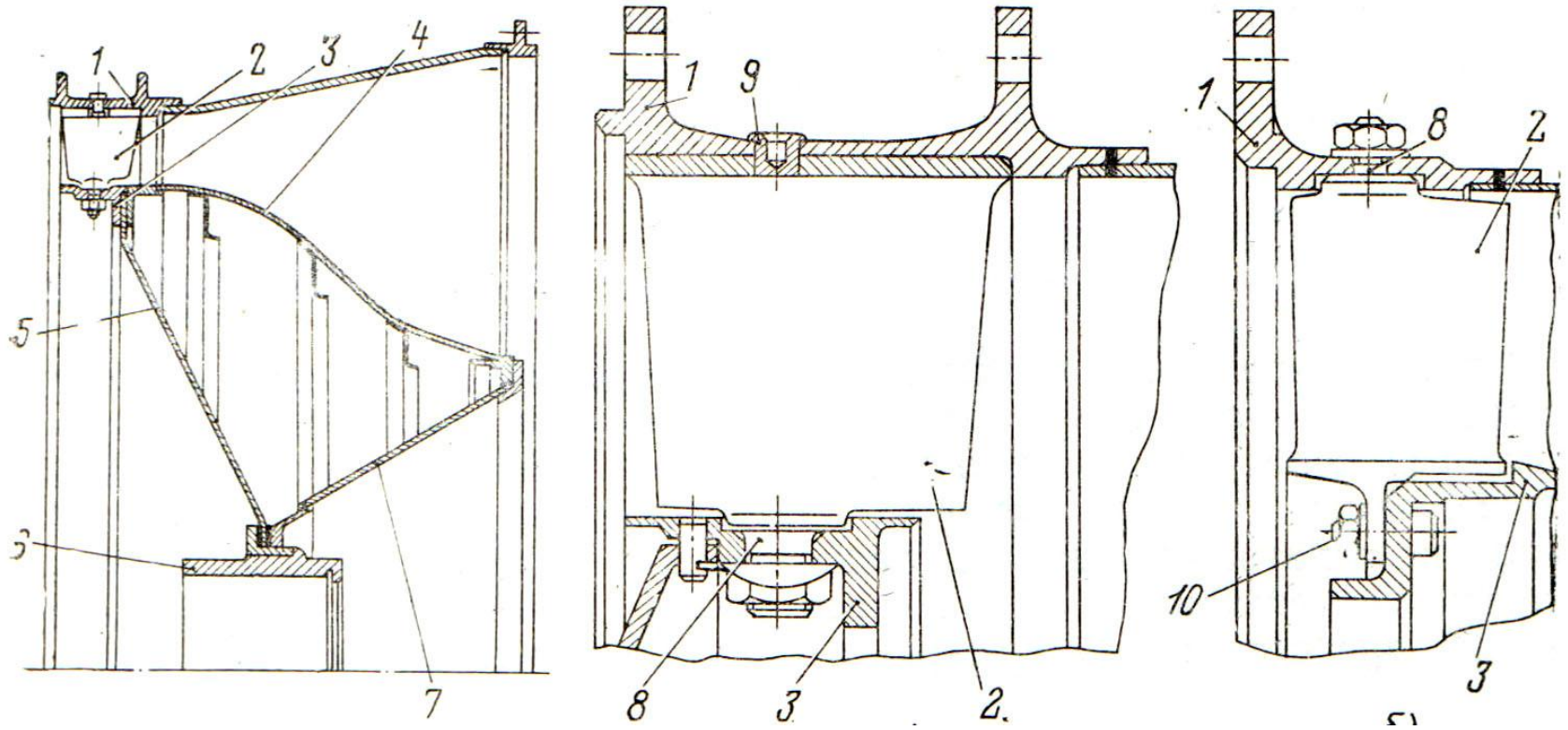
регулируемая  
выходная  
кромка





**Задний корпус  
с узлом задней опоры**

**Задний корпус с узлом задней опоры**



## Средний корпус (корпус направляющих аппаратов) с неподвижными лопатками НА

### Крепление направляющих лопаток

с секторами двухпорных лопаток

с консольными лопатками с кольцевым замком

⊕ жесткость

⊖ свобода тепловых расширений?

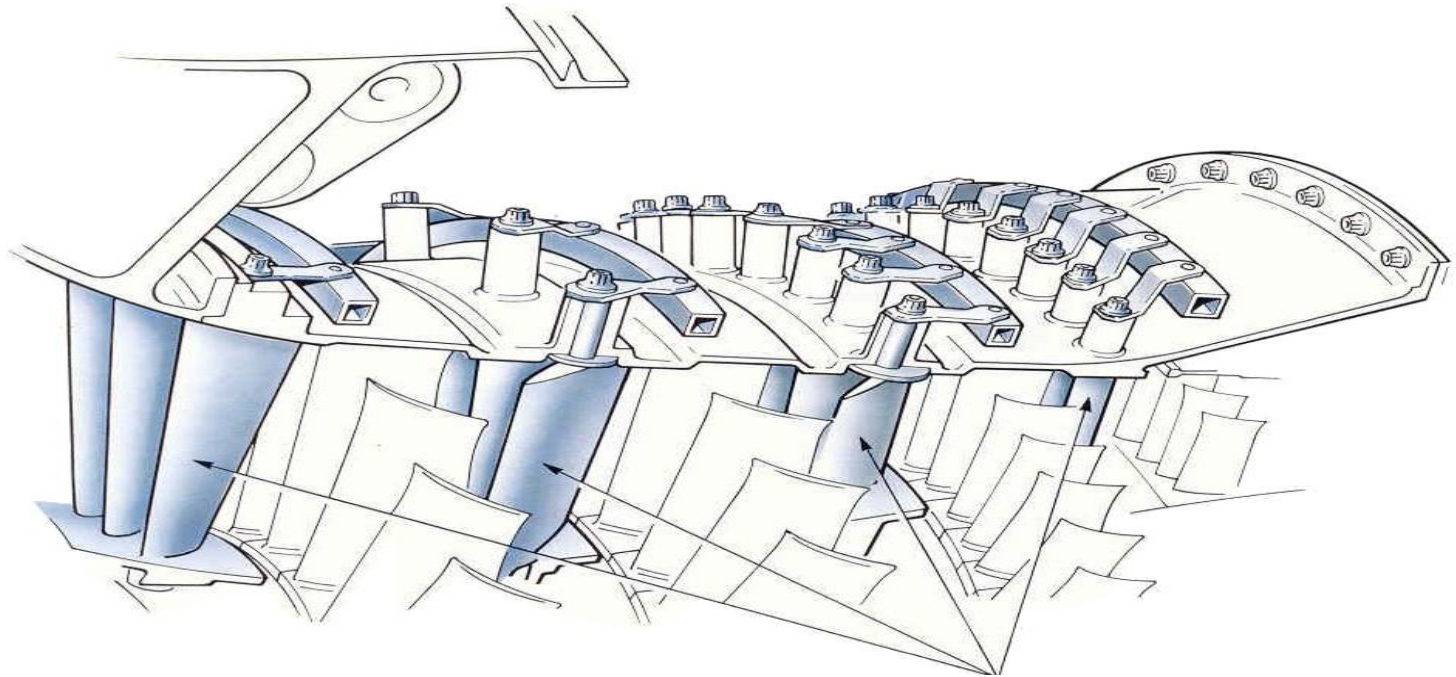


с консольными лопатками с замком типа «ласточкин хвост» в секторном кольце

⊕ простота

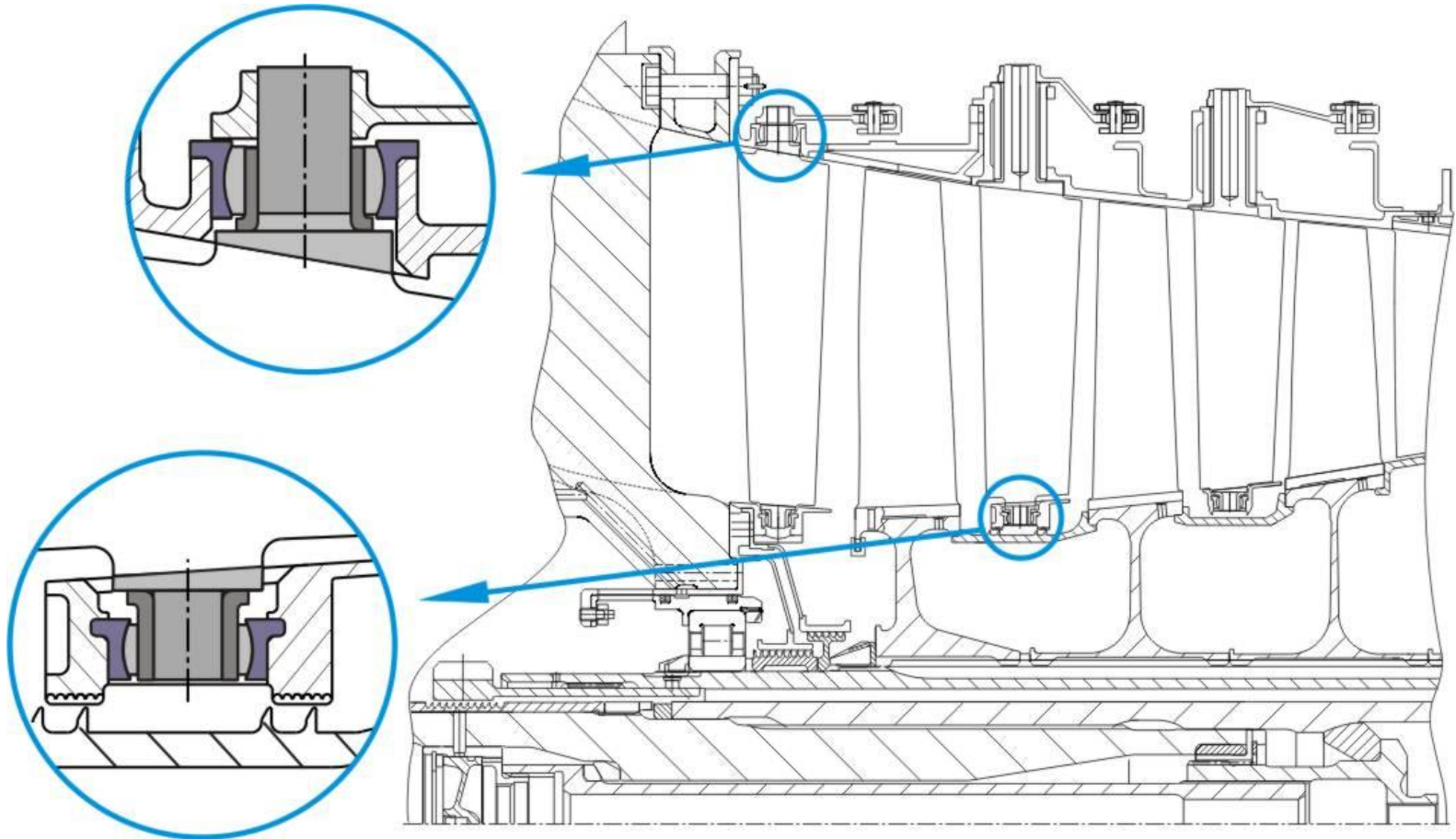
⊖ вибрации

Корпус с регулируемыми лопатками НА



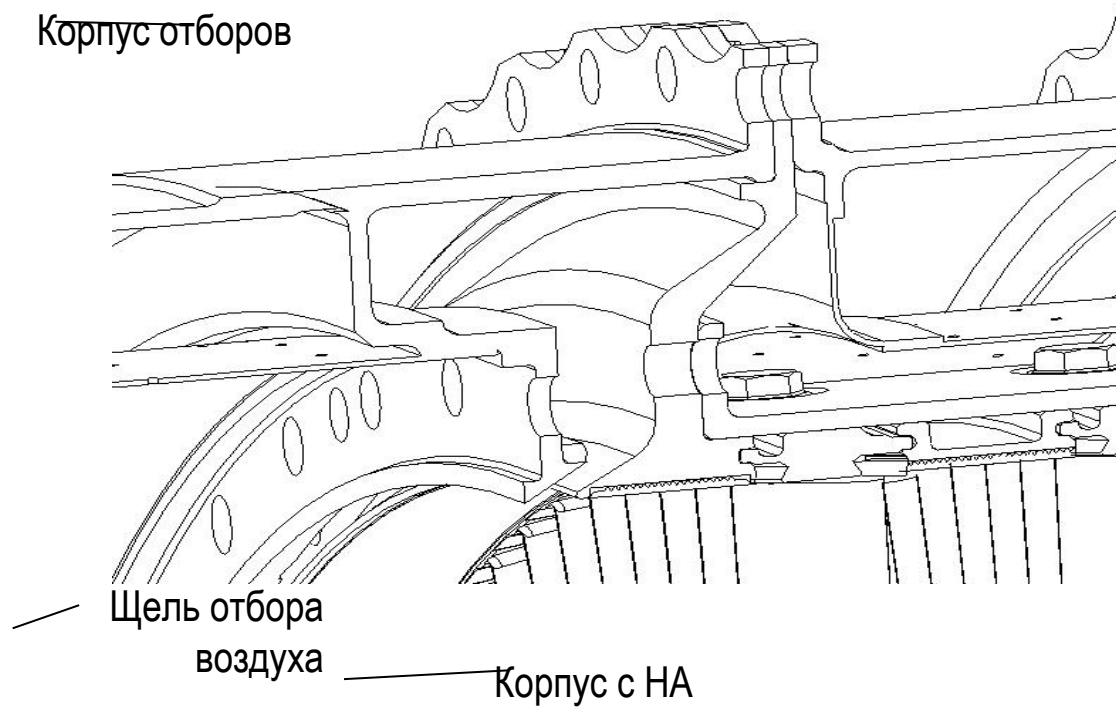
Регулируемые НА

Шарниры лопаток в поворотном направляющем аппарате

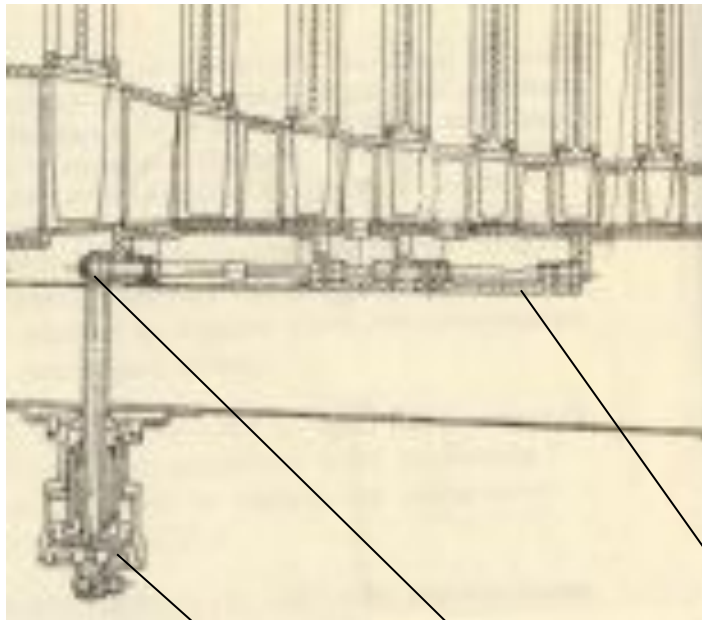




Корпус отборов

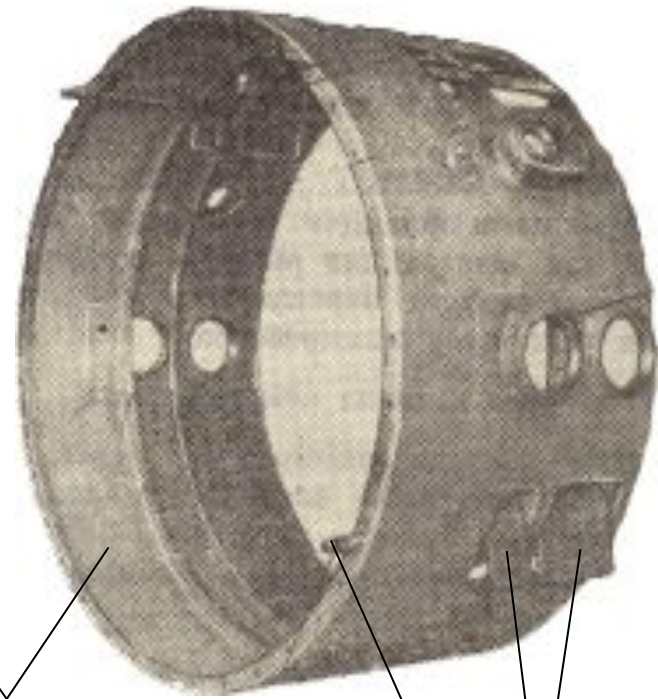


Корпус перепуска воздуха



Гидроцилиндр

Рычаг



Корпус перепуска воздуха

Ось

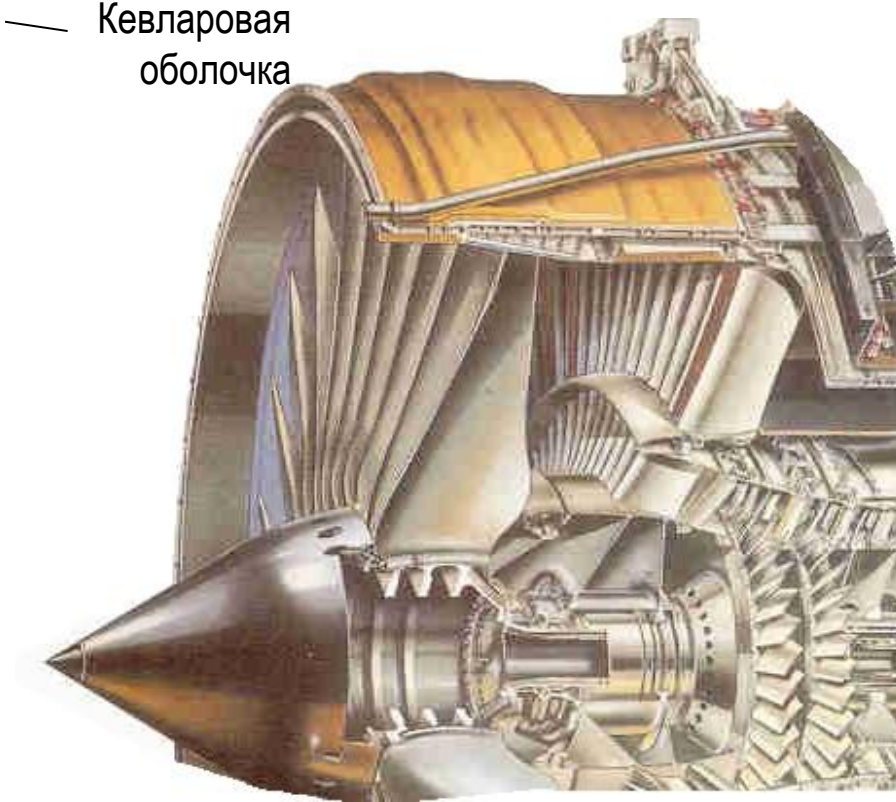
Дроссельные заслонки

Корпус вентилятора

Trent 800

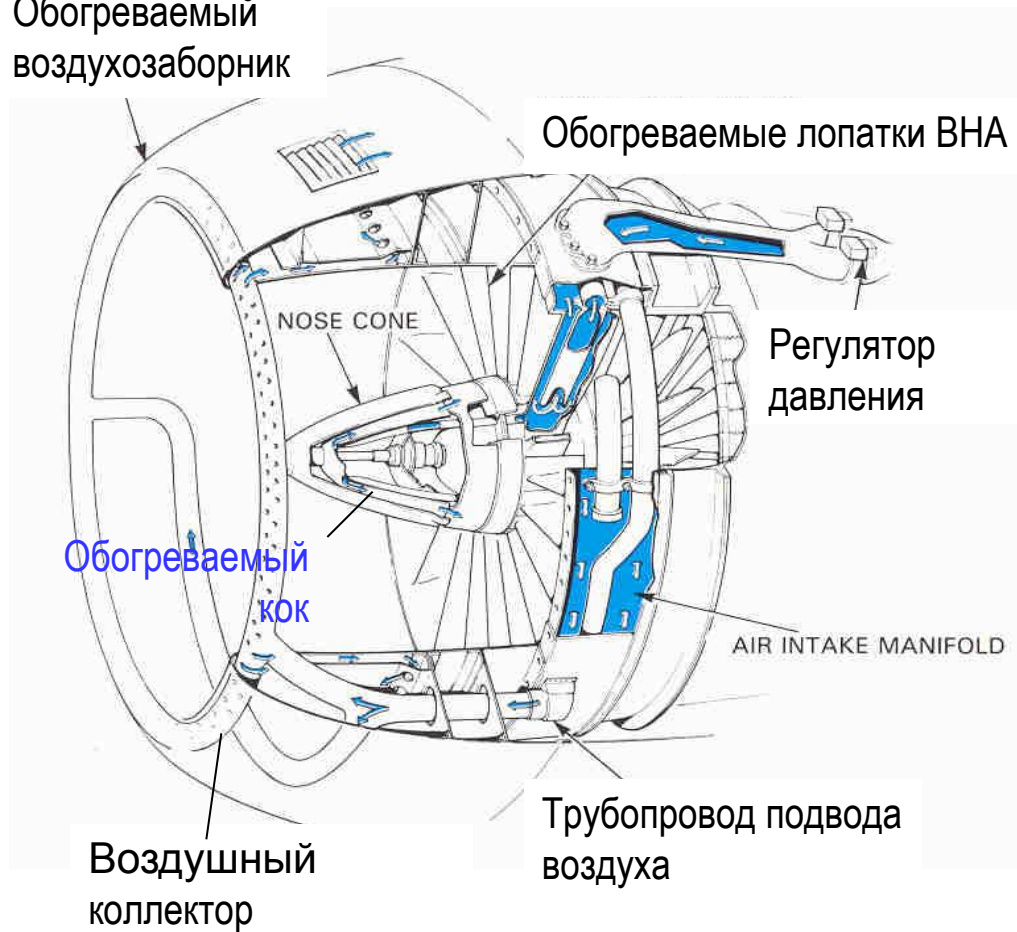
Алюминиевый корпус-матрица

Кевларовая оболочка



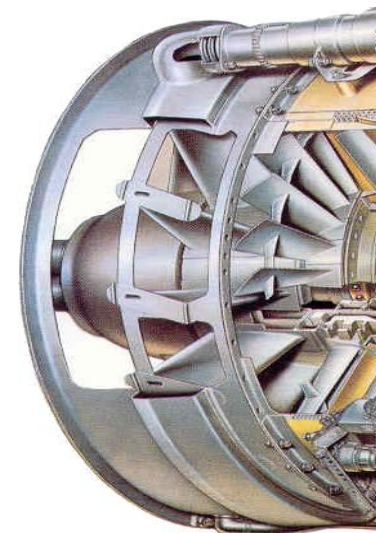
# Противообледенительная система

Обогреваемый  
воздухозаборник

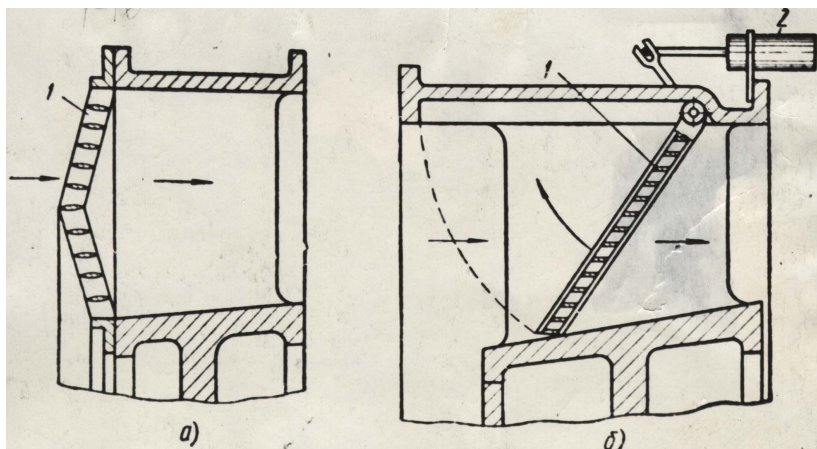


Подвод  
воздуха на  
обогрев

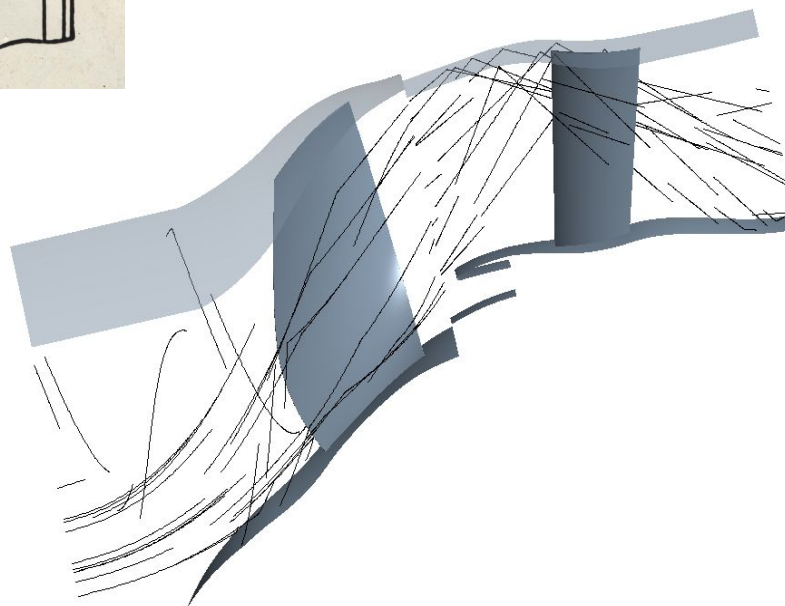
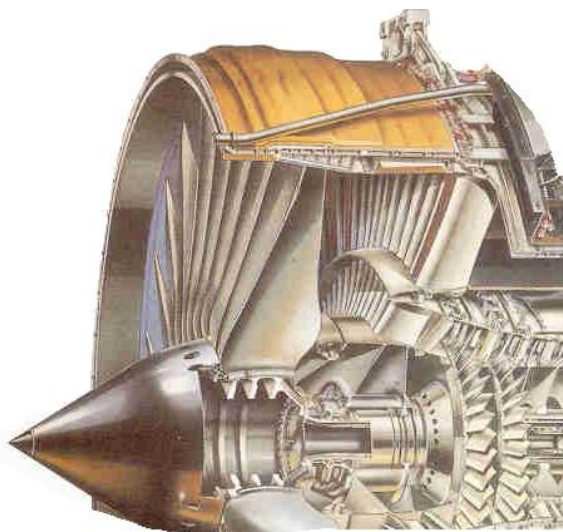
Канал  
обогрева  
входной  
кромки



## Защита от попадания посторонних предметов



- гидравлические потери
- лед на сетке



расчетные траектории движения посторонних предметов в потоке воздуха перед воздухозаборником и в его канале

## Материалы деталей компрессора

### Критерии выбора:

- Механические характеристики при рабочей температуре
- Стойкость к коррозии и эрозии
- Минимальный вес детали
- Технологичность
- Стоимость

### Механические характеристики

- Предел прочности  $\sigma_B$
- Предел текучести  $\sigma_T$
- Предел длит.прочности  $\sigma_{дл}$
- Предел выносливости  $\sigma_{-1}$

### Лопатки ротора и статора

**До 250°C** (лопатки вентилятора, КНД кроме 1-й ст)  
алюминиевые сплавы (АК4-1, ВД-17)

ПКМ (углепластики)

**До 500°C** (лопатки КВД, кроме последних ступеней)  
жаропрочные титановые сплавы (ВТ3-1, ВТ-8)

**До 700°C** (лопатки последних ступеней КВД )  
жаропрочные хромоникелевые стали (ЭИ-787)

### Диски

Титановые сплавы (ВТ3-1, В Т18)

Жаропрочные хромоникелевые стали (ЭИ-787)

### Корпусные детали

титановые сплавы (ВТ20) и лег.стали (ЭП-718)

### Валы

предел выносливости - стали (40ХНМА, ЭП-517)