

# ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Модуль 4** Основные элементы газотурбинных установок: камеры сгорания; компрессоры; турбины

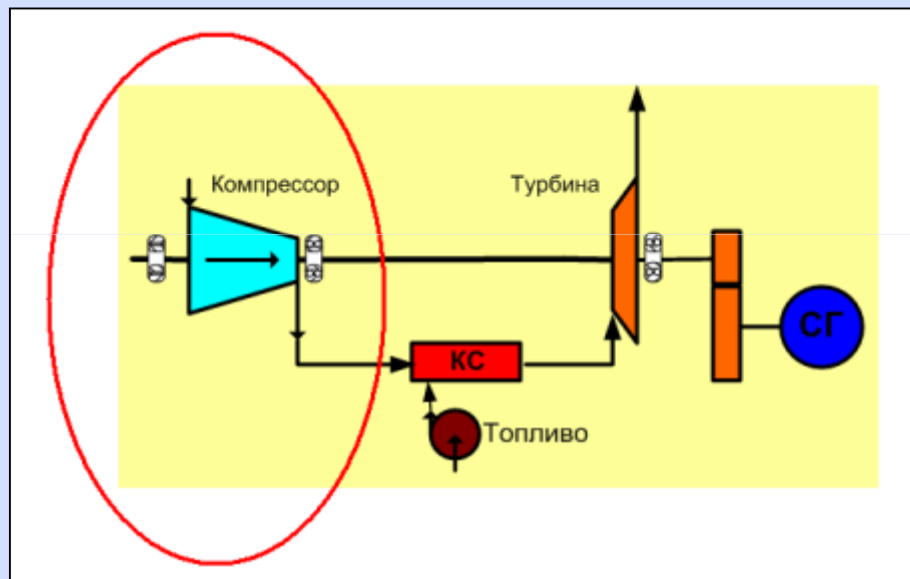
**Тема 1** Компрессоры газовых турбин



Разработчик: к.х.н., доцент каф. ТХНГ Н.В. Чухарева



**Компрессор** - это машина, предназначенная для преобразования механической энергии в потенциальную энергию давления и энергию перемещаемого газа



**Назначение:** обеспечивает повышение давления рабочего тела и непрерывную его подачу в камеру сгорания за счет потребления части механической энергии, выработанной турбинами

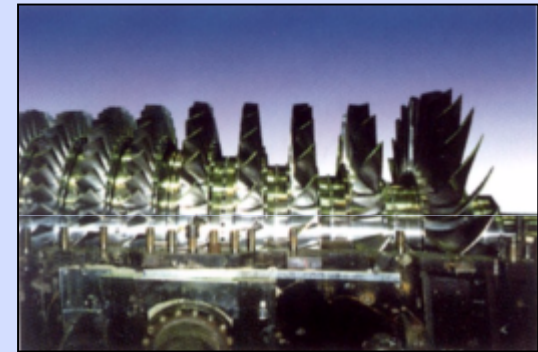
## Основные характеристики компрессоров ГТУ

### Степень повышения давления (сжатия)

Способность компрессора повышать давление характеризуется **степенью повышения давления**, под которой понимают отношение давления на выходе из компрессора ( $P_2$ ) к давлению на входе ( $P_1$ ):

$$\pi_k = \frac{P_2}{P_1} \quad (1)$$

С **повышением температуры** газа перед турбиной **степень повышения давления возрастает**. У современных осевых компрессоров средняя степень:



$$\pi_k = 20 \div 30$$

## Основные характеристики компрессоров ГТУ

**Производительность**

**Массовая**

**Количество массы газа (кг/с),  
перемещаемого в единицу  
времени**

**Объемная**

**Объем газа (м<sup>3</sup>/с), перемещаемого  
компрессором в единицу времени**



У современных осевых компрессоров массовая производительность достигает 100...150 кг/с.

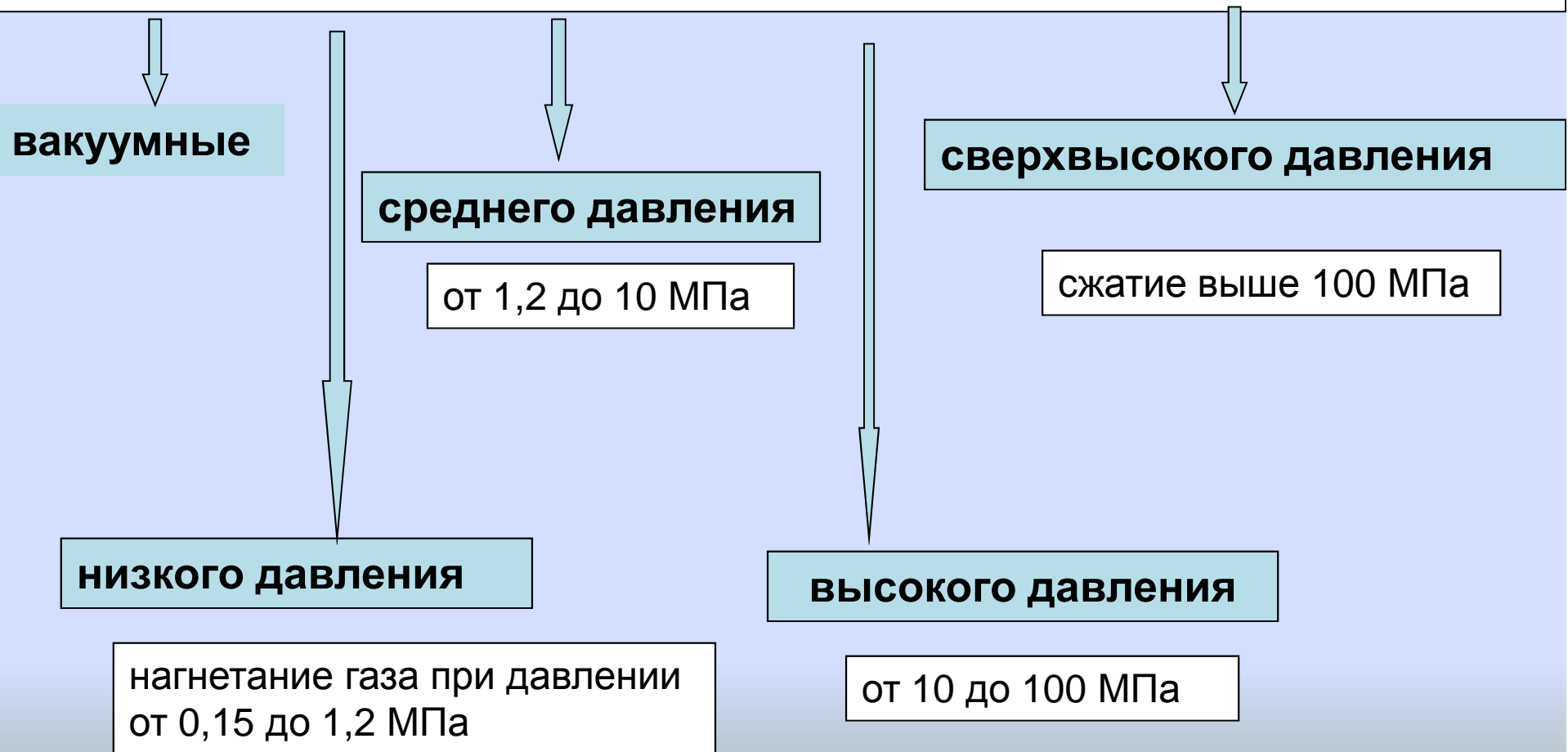
## Основные характеристики компрессоров ГТУ

Качество преобразования механической энергии в потенциальную энергию давления и кинетическую энергию перемещаемого газа **определяется эффективным КПД**, который лежит в пределах 0,85...0,88.

Имеется еще ряд параметров, характеризующих техническое совершенство компрессоров - коэффициент устойчивости, массогабаритные характеристики, технологичность, дешевизна производства и др



## Разделение компрессоров по конечному давлению



## Разделение компрессоров по особенностям самого процесса повышения давления

*(по принципу действия)*

### Объемные

**Объемный (поршневой) компрессор** – устройство, в котором процесс сжатия происходит в рабочих камерах, изменение давления происходит за счет периодического изменения объема этих камер, попеременно сообщающихся с входом и выходом компрессора

### Динамические

Самые распространенные:

**центробежные**

**осевые**

**Динамический компрессор** – в котором сжатие газа происходит в результате взаимодействия потока с вращающейся и неподвижной решетками лопастей



## Поршневой компрессор

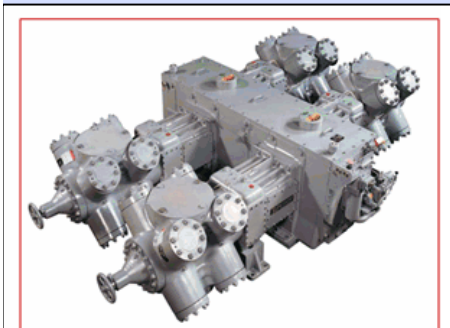


Рис. Принцип работы поршневого компрессора: 1- индекс 1 относится к состоянию воздуха на входе в компрессор 2) индекс 2 - к состоянию сжатого воздуха

**Работа** поршневого компрессора описывается соотношением  $P_1V_1=P_2V_2$  ( $T=\text{const}$ )  
**Закон Бойля-Мариотта**

**Производительность** компрессора определяется объемом цилиндра, а **степень повышения давления** зависит от хода поршня

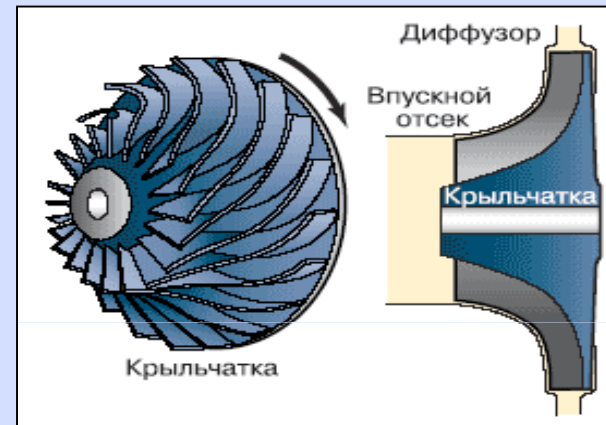
**Достоинства** поршневых компрессоров является их простота и низкая начальная стоимость

**Недостатком** является необходимость частого технического обслуживания цилиндра и поршневой группы, а также трудоемкость замены этих деталей



## ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ КОМПРЕССОР

**Принцип действия:** Центробежные компрессоры повышают давление за счет увеличения скорости потока воздуха



Центробежные компрессоры повышают давление воздуха, придавая ему скорость при помощи вращающейся крыльчатки и преобразуя ее в давление. Каждая ступень сжатия в центробежном компрессоре состоит из вращающейся крыльчатки и неподвижных отсеков для впуска и выпуска. Воздух направляется в „устье“ вращающейся крыльчатки через впускное отверстие. Крыльчатка сообщает потоку воздуха дополнительную скорость и выпускает его через **диффузор**, где скорость преобразуется в давление

**Конфузоры** - это каналы, в которых происходит ускорение потока (сужающийся при дозвуковом течении и расширяющийся при сверхзвуковом)

**Диффузоры** – это каналы, в которых поток газа тормозится (сужается при сверхзвуковом течении и расширяется при дозвуковом)

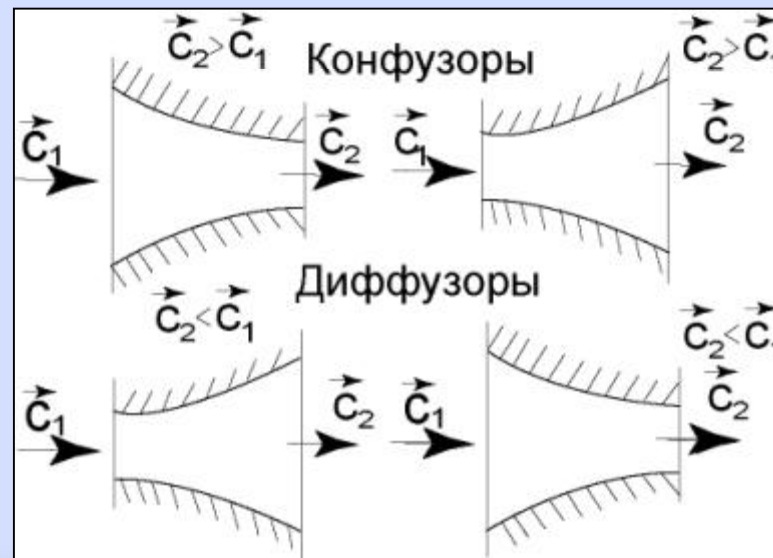
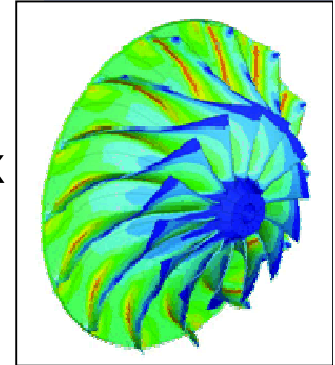


Рис. Течение газа в конфузорах и диффузорах

## **Достоинства:**

1. Поток воздуха и система смазки механизма компрессора являются независимыми, они разделены уплотнениями и пространством атмосферного воздуха. То есть технология сжатия воздуха в таких компрессорах позволяет получать безмаслянный воздух без дополнительных затрат, связанных с установкой сложных и дорогих устройств очистки воздуха



2. Центробежные компрессоры работают при гораздо меньших уровнях вибрации, чем компрессора объемного типа (меньше требований к прочности фундамента и опор присоединяемых трубопроводов)

3. В отличие от объемных компрессоров, на выходе центробежных компрессоров не надо устанавливать глушители шума или емкости-ресиверы. В результате затраты на монтаж центробежных компрессоров ниже, чем для компрессоров объемного типа

**Недостатки:** Недостатками компрессора центробежного **по сравнению с осевым компрессором** являются более низкий адиабатический к. п. д. и больший габаритный диаметр при одинаковых значениях расхода воздуха и степени повышения давления.

## ОСЕВОЙ КОМПРЕССОР

Компрессор, с движением и сжатием рабочего тела (воздуха) вдоль оси – называют **осевым компрессором**

КПД осевого компрессора (ОК) **больше**, чем у центробежного нагнетателя, и может достигать до 90% при низкой окружной скорости (180...200 м/с) до 86 % (при окружной скорости 250...300 м/с).

Осевые компрессоры по сравнению с центробежными обладают большой производительностью, малыми радиальными размерами и массой.



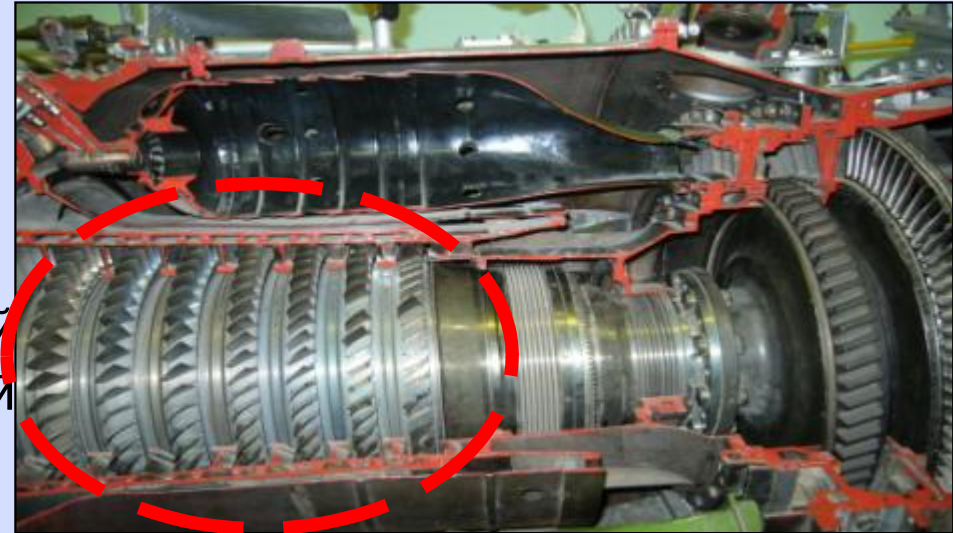
Ротор осевого компрессора с установленными на него рабочими лопатками

Для комплектации современных ГТУ применяются осевые **многоступенчатые** компрессоры (**до 16 ступеней**).

Степень повышения давления в одной ступени достигает в среднем значений  **$\pi_{к ст} = \text{до } 1,3 \dots 1,7$** .

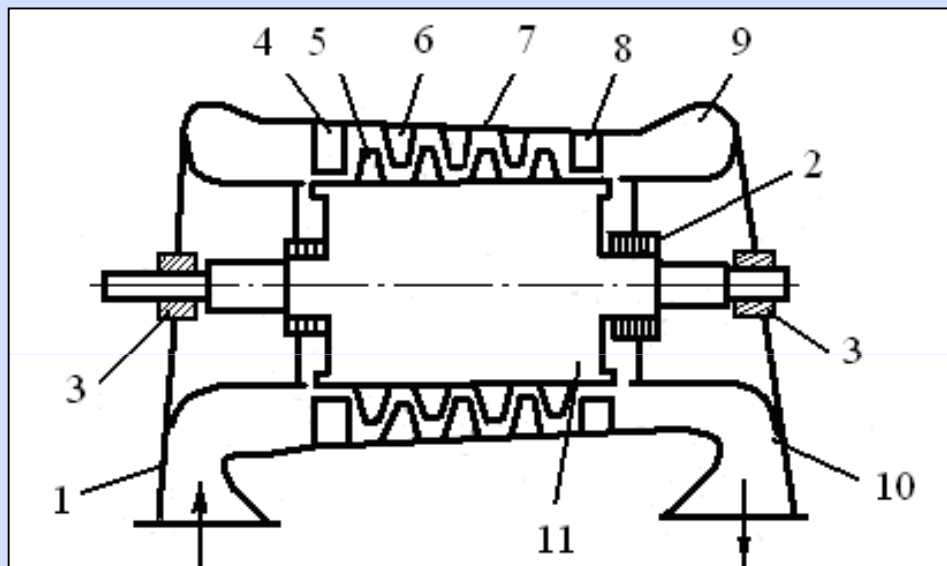
Разрабатываются компрессоры с  **$\pi_{к ст} = \text{до } 3,5$**

Цилиндрический узел корпуса может состоять из **ряда цилиндрических секций соединенных болтами по осевому направлению** между каждой ступенью или корпус может иметь **две половины с соединением на болтах по центральной осевой линии стыка**.





## Схема многоступенчатого осевого компрессора



**1**-входной патрубок;

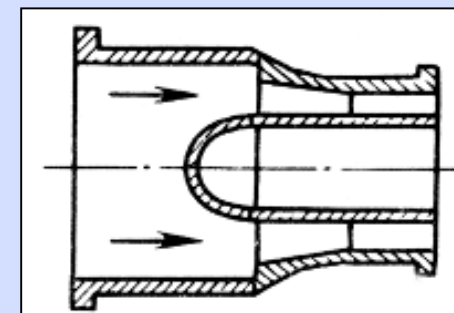
**2**-концевые уплотнения; **3**-подшипники;

**4**-входной направляющий аппарат;

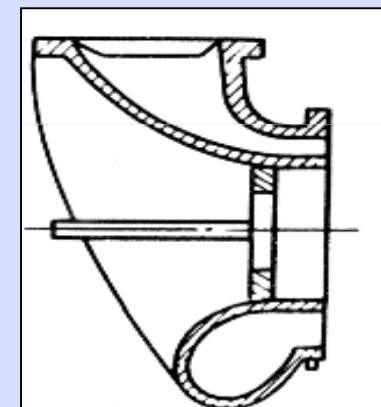
**5**-рабочие лопатки; **6**-направляющие лопатки;

**7**-корпус ; **8**-спрямляющий аппарат;

**9**-диффузор; **10**-выходной патрубок; **11**-ротор



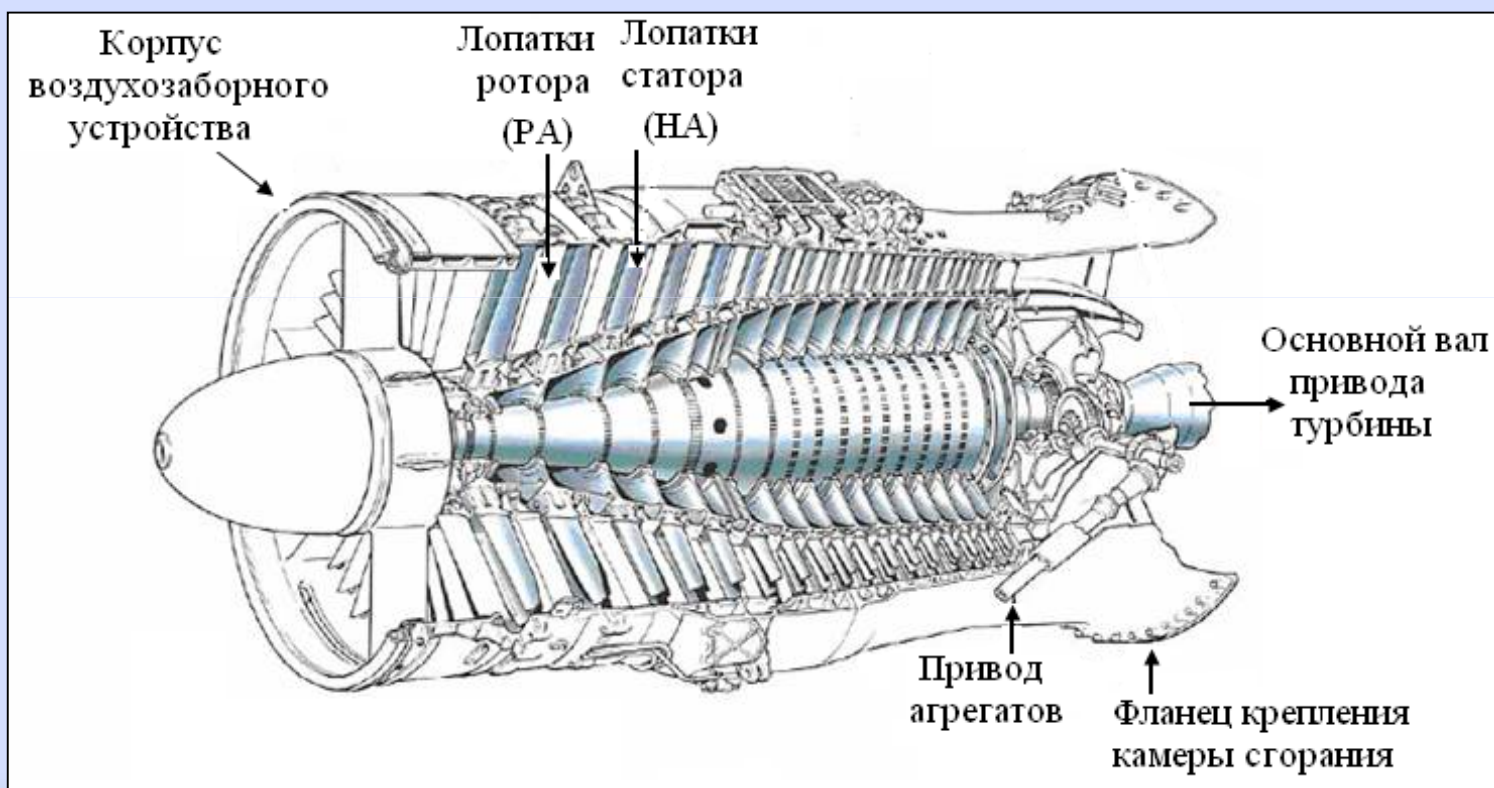
а)



б)

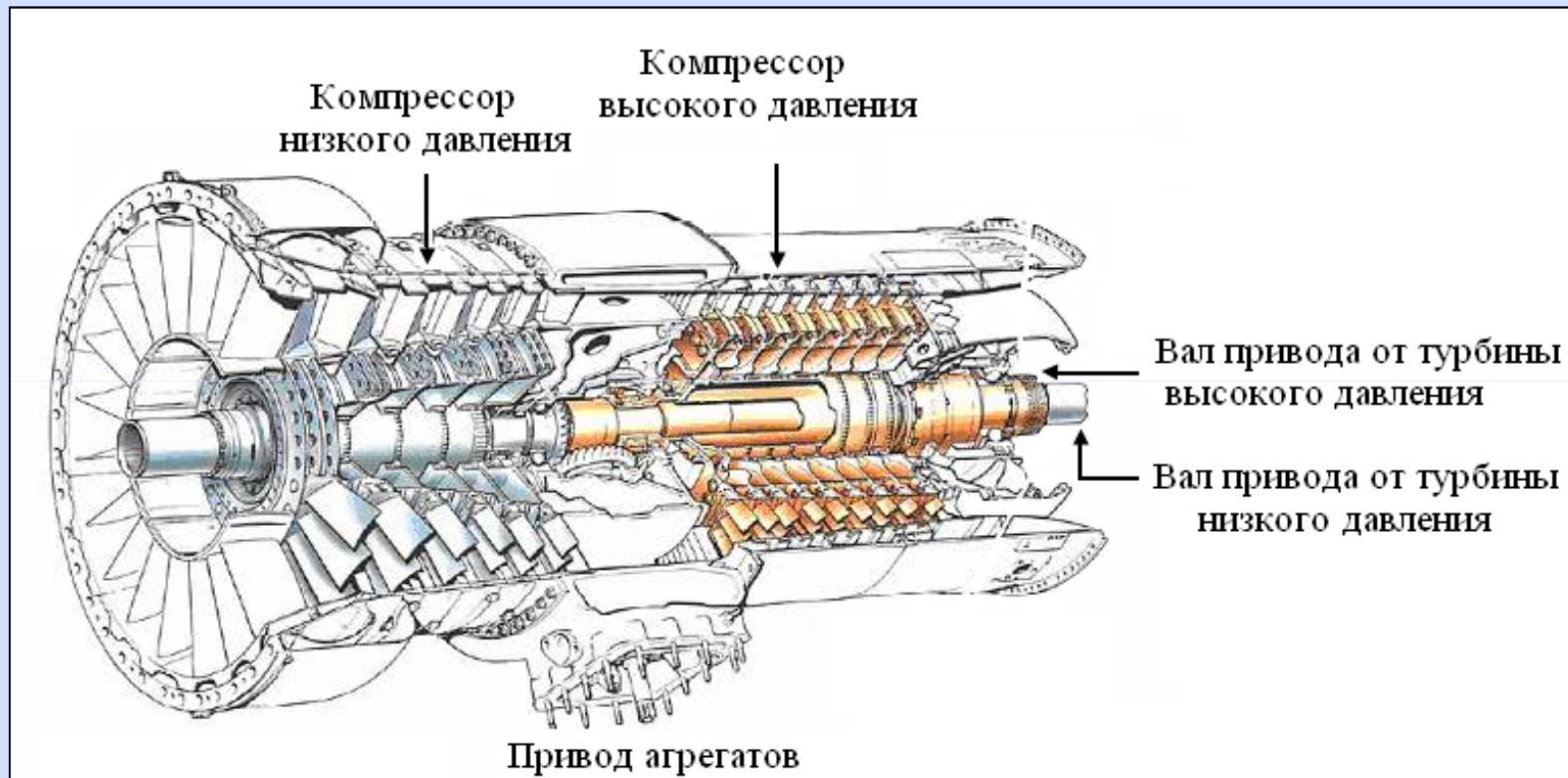
Осевой (а) и угловой (б)  
входные патрубки  
осевых компрессоров

## Однокаскадный осевой компрессор



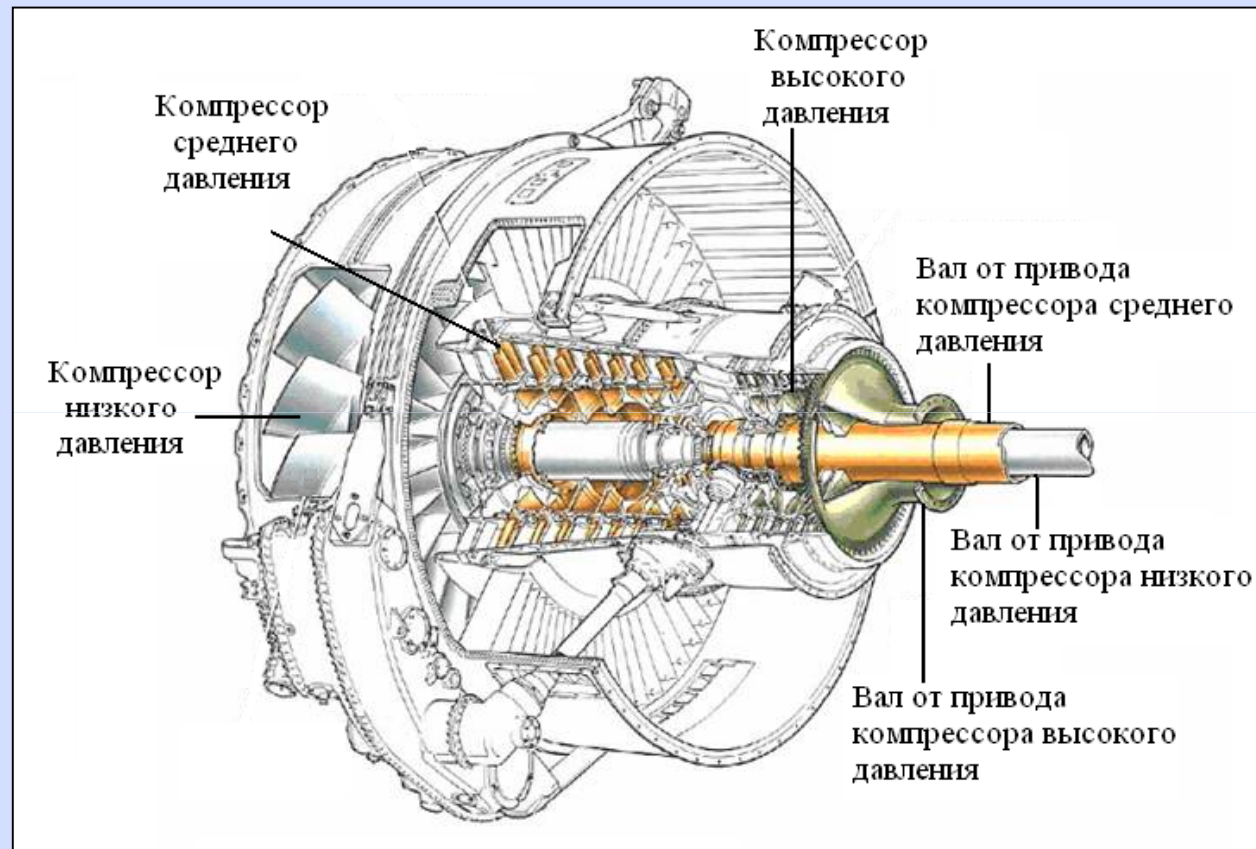


## Двухкаскадный осевой компрессор



Совмещение осевого компрессора низкого и высокого давлений

## Трехкаскадный осевой компрессор



Совмещение ОК низкого, среднего и высокого давления в общем силовом корпусе

## СТУПЕНЬ КОМПРЕССОРА

**Ступенью компрессора** называется сочетание неподвижного направляющего аппарата и рабочего колеса

### Диффузор

Превращение кинетической энергии потока рабочего тела в энергию давления

Угол раскрытия диффузора небольшой до  $14...18^\circ$



Степень повышения давления до  $1,1...1,15$

Угол раскрытия диффузора небольшой более  $18^\circ$



Падение КПД диффузора

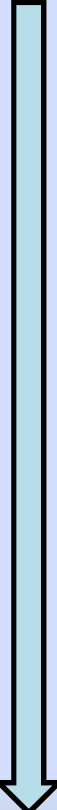


Отрыв пограничных слоев рабочего тела

**Требуется последовательное соединение нескольких диффузоров (многоступенчатое сжатие)- получение высоких степеней повышения давления**

## СТУПЕНЬ КОМПРЕССОРА

### Рабочее колесо

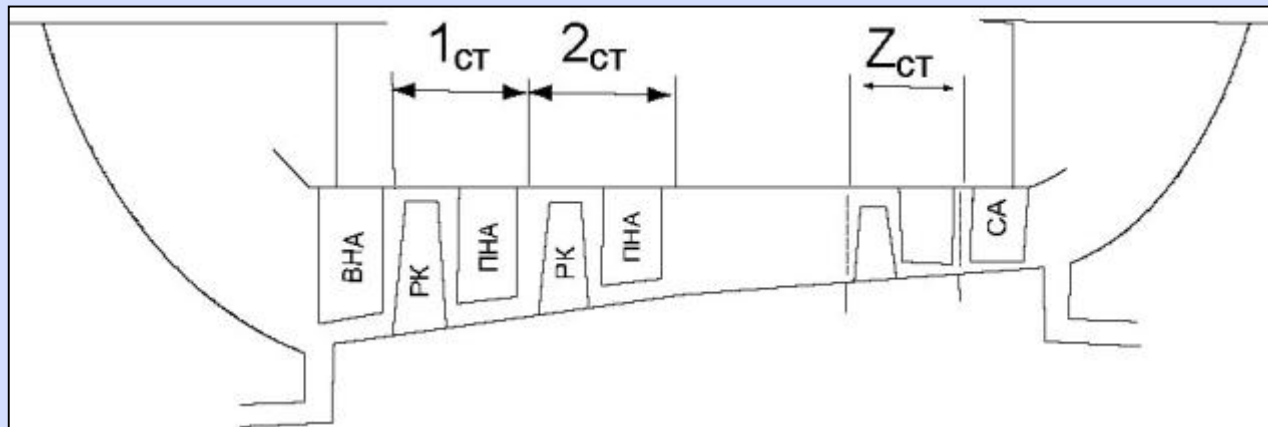


Установка перед каждым диффузором устройства, в котором механическая энергия преобразовывается в кинетическую

Движущиеся лопатки разгоняют рабочее тело до высокой скорости

Запасенная газом, кинетическая энергия преобразовывается в энергию давления в диффузорных неподвижных межлопаточных каналах лопаток





### Многоступенчатый компрессор включает:

1. Рабочие колеса (**РК**), закрепленных на одном валу;
2. неподвижные лопатки - промежуточный направляющий аппарат (**ПНА**);
3. За последней ступенью компрессора устанавливается спрямляющий аппарат (**СА**)

Лопаточная решетка рабочего колеса (РК) часто выполняется диффузорной. Это позволяет увеличить степень повышения давления в ступени

### Переносная скорость $U$ -

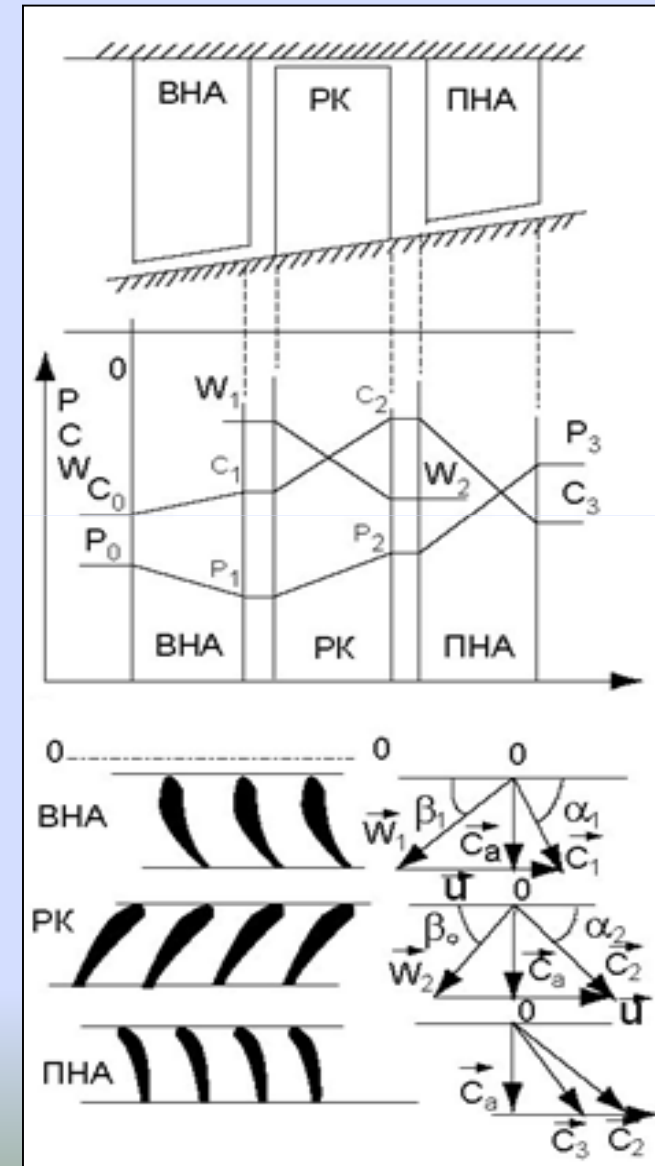
обусловлена вращательным движением рабочих лопаток, остается постоянной по направлению и величине на входе и выходе каждой лопатки

### Относительная скорость $w$ -

определяется только скоростью вращения вала компрессора и расстоянием от оси вращения, связана с перемещением воздушной среды по поверхности лопаток, изменяется как по величине, так по направлению и зависит от профиля лопатки.

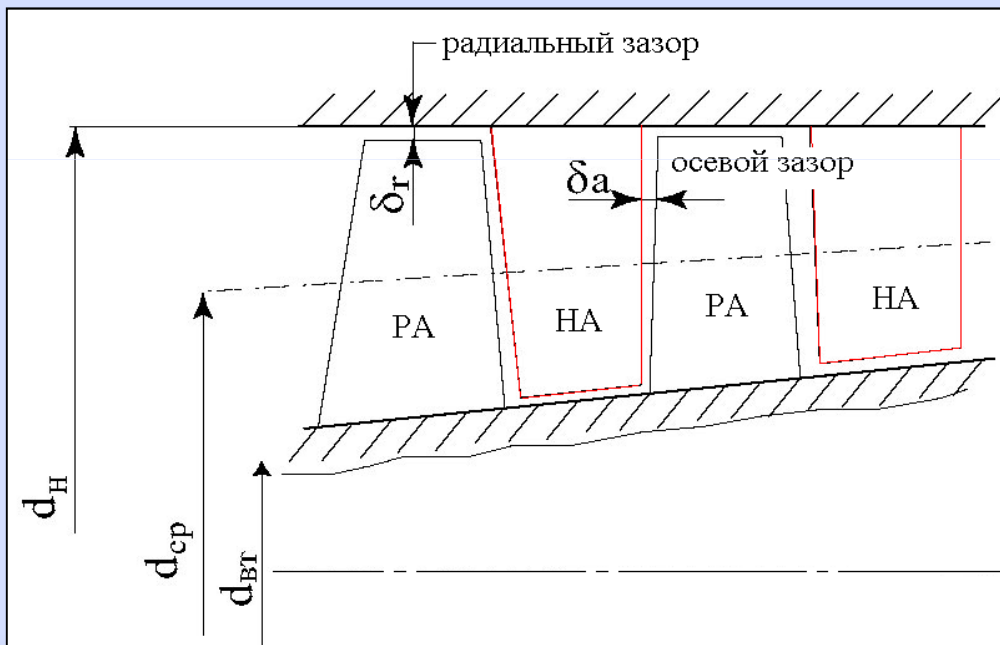
### Абсолютная скорость $C$ -

определяется в виде геометрической суммы переносной и относительной, изменяется по величине и направлению





Реальная ступень осевого компрессора ограничена внутренней расточкой корпуса компрессора, имеющего наружный диаметр =  $d_H$ , и наружной поверхностью ротора с диаметром втулки =  $d_{вм}$



Если пренебречь радиальным зазором, то высота ступени

$$l_{cm} = \frac{d_H - d_{вм}}{2} = d_H \frac{1 - \bar{d}}{2},$$

$$\bar{d} = \frac{d_{вм}}{d_H} \quad \text{- втулочное отношение}$$

**Шаг ступени**, изменяется по высоте ступени:

$$t = \frac{2 \pi r}{z_l},$$

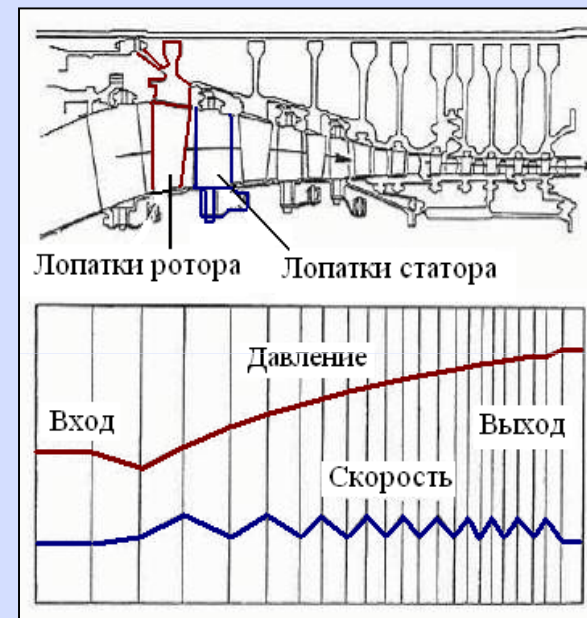
$r$  - текущий радиус, изменяющийся от радиуса втулки до радиуса наружного ;

$z_l$  - число лопаток РК или ПНА ступени.



Возможность создавать **многоступенчатые осевые компрессоры с управляемой скоростью** потока воздуха и основного потока воздуха минимизирует потери и приводит к высокому КПД и, следовательно, меньшему расходу топлива.

Это дает последующие **преимущества над центробежными компрессорами**, где такие условия в своей основе не так просто достичь.



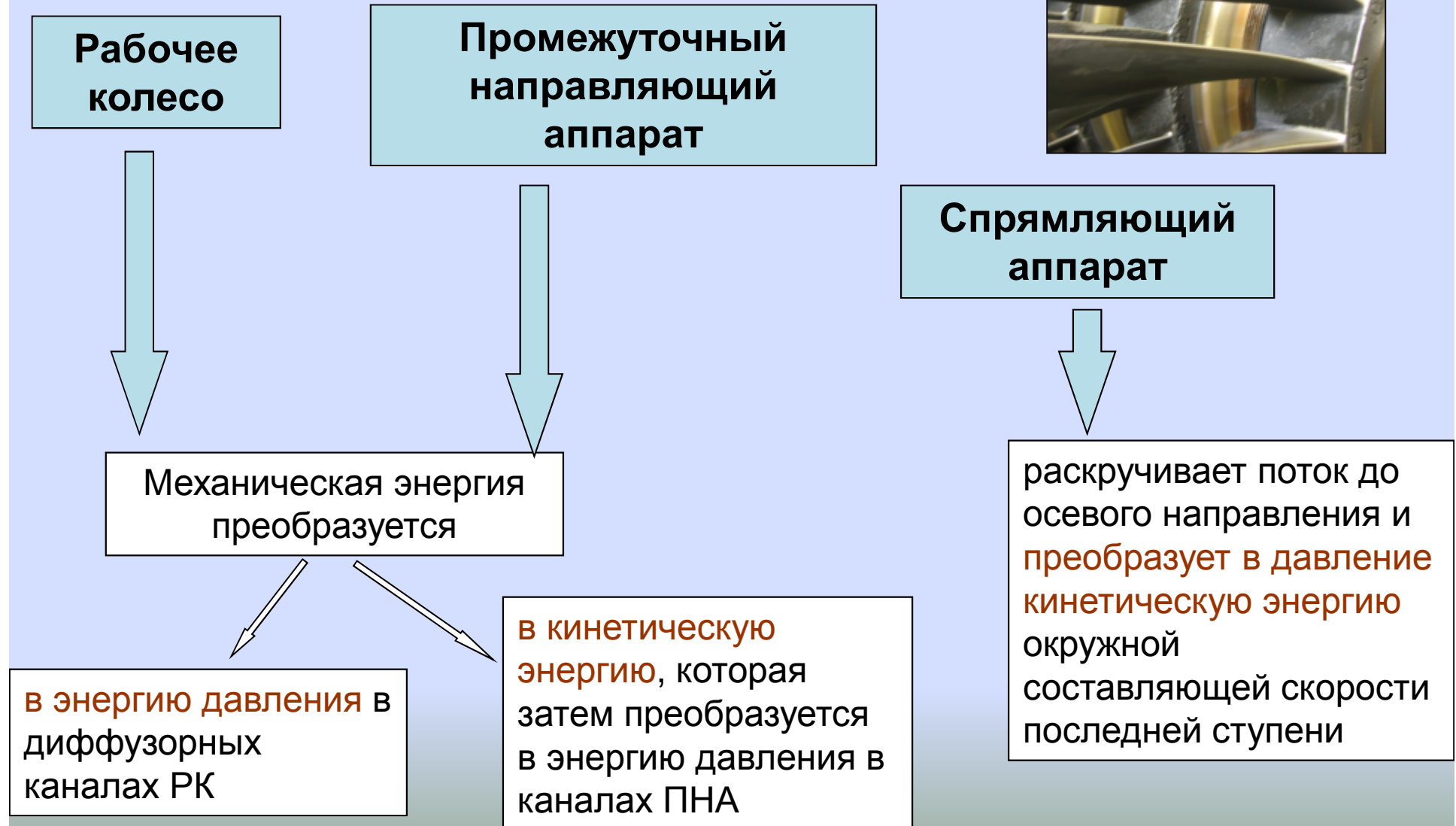
Большой перепад давления на одном компрессоре



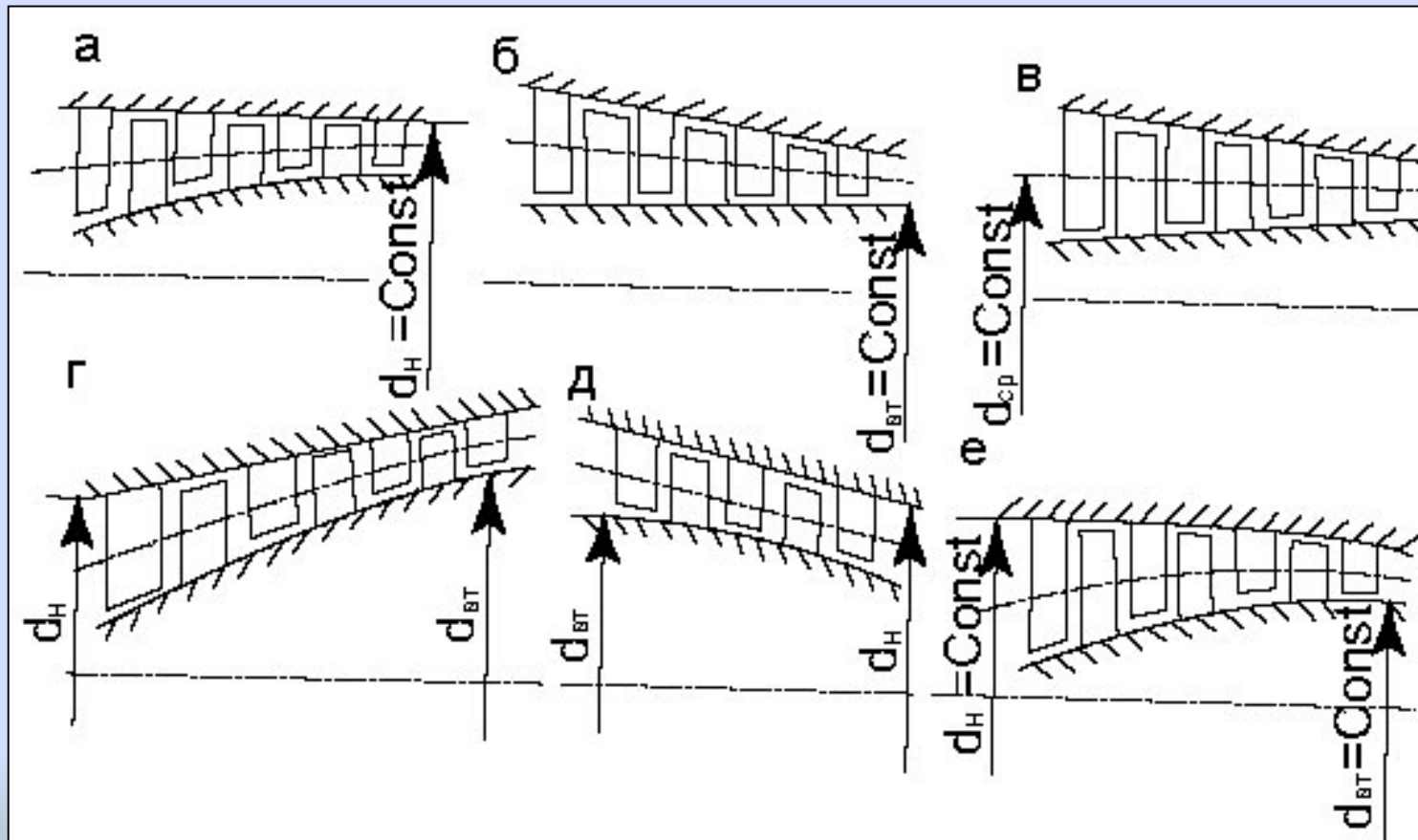
Изменяемый сопловой аппарат на статоре



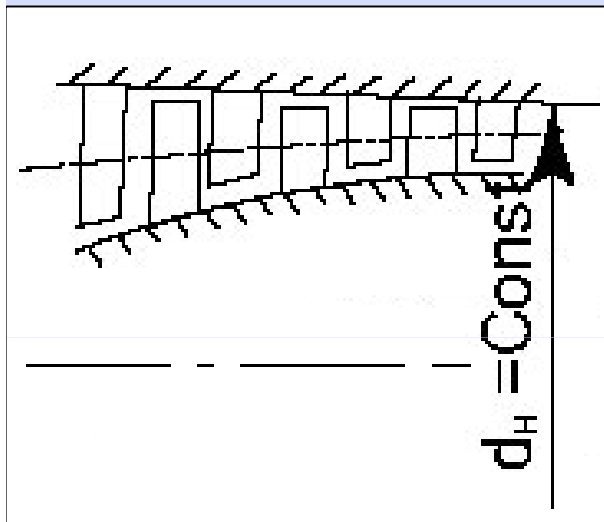
Исправление угла атаки рабочих лопаток относительно потока воздуха до допустимого уровня для исключения срывов потока воздуха



## ФОРМЫ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ОСЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ



## Профилирование проточной части компрессора по закону $d_H = \text{const}$



Напорность ступеней увеличивается (густота решетки и средняя окружная скорость каждой последующей ступени возрастают )

### Достоинства:

1. Величина напора второй ступени выше величины напора первой ступени на 25...30%

(Чем меньше  $\bar{d}$  отношение первой ступени, тем больше может быть это увеличение)

2. Меньшее число ступеней компрессора

3. Закон  $d_H = \text{const}$  способствует повышению экономичности компрессора, так как здесь удастся сохранить постоянными минимальные радиальные зазоры по всей длине компрессора

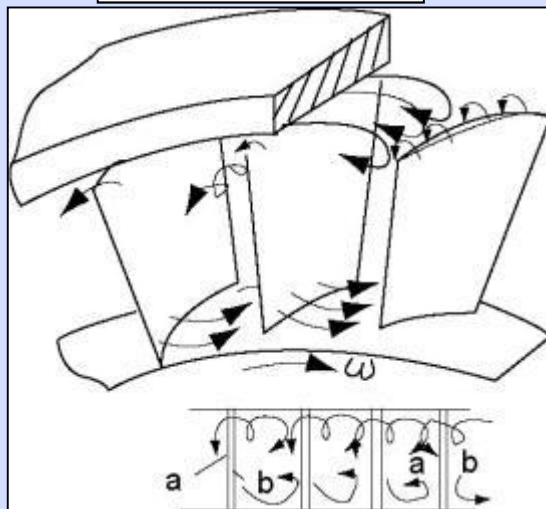
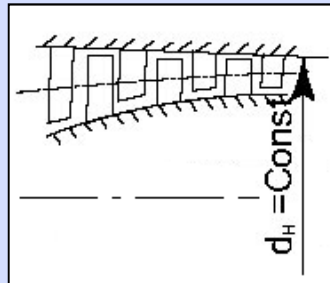


Схема образования индуктивных потерь

## Недостатки:

1. Резкое уменьшение высот лопаток последних ступеней из-за возрастающего среднего диаметра  $d_{cp}$

Усиливается отрицательное влияние пограничных слоев на роторе и статоре за счет уменьшения ядра потока газа

Увеличиваются потери от вторичных перетеканий (индуктивные потери)

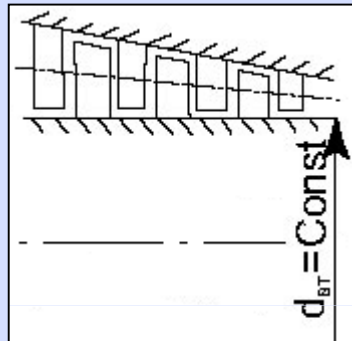
2. Снижение КПД последних ступеней

3. Данный тип проточной части применим для высоты последней ступени лопаток не менее 30...35 мм

4. Применяют для КНД, так как высота рабочих лопаток его последних ступеней 70...100 мм и здесь не сказывается заметное влияние индуктивных потерь

## Профилирование проточной части компрессора по закону $d_{BT} = \text{const}$

### Достоинства:

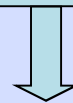


1. Технологические преимущества в изготовлении ротора, особенно барабанного типа, и возможности унификации узлов крепления рабочих лопаток

2. Так как  $d_{cp}$  по ходу движения газа уменьшается, то при прочих равных условиях длины лопаток последних ступеней будут больше, чем у ступеней, проточная часть которых выполнена по закону  $d_H = \text{const}$ .

### Недостатки:

Уменьшение от ступени к ступени числа Маха и напорности за счет падения окружной скорости



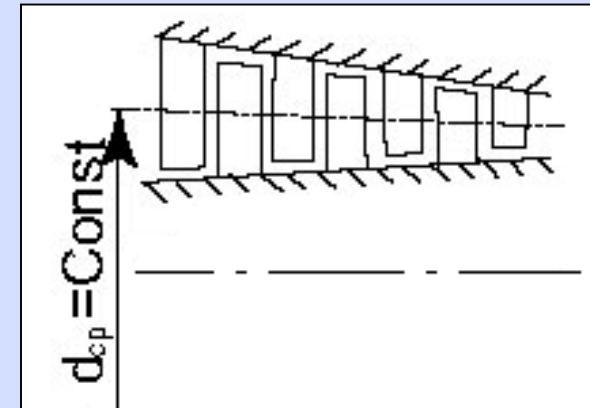
Увеличение числа ступеней компрессора при заданном  $\pi_k$

$$M = \frac{c}{a};$$

- число Маха, где  $c$  - скорость газа,  $a$  - скорость звука в газовой среде

Проточная часть компрессора  
выполнена по закону  $d_{cp} = const$

$d_H$  и  $d_{BT}$  – переменные величины



### Достоинства:

1. Высоты лопаток последних ступеней компрессора будут **больше, чем при законе  $d_H = const$**
2. Так как по ходу движения газа уменьшается окружная скорость, то при использовании закона  **$d_{cp} = const$**  можно применять повышенные окружные скорости на среднем диаметре, не опасаясь возникновения сверхзвуковых течений на периферийном диаметре

напорность ступеней  
увеличивается

общее число ступеней  
снижается

### Недостатки:

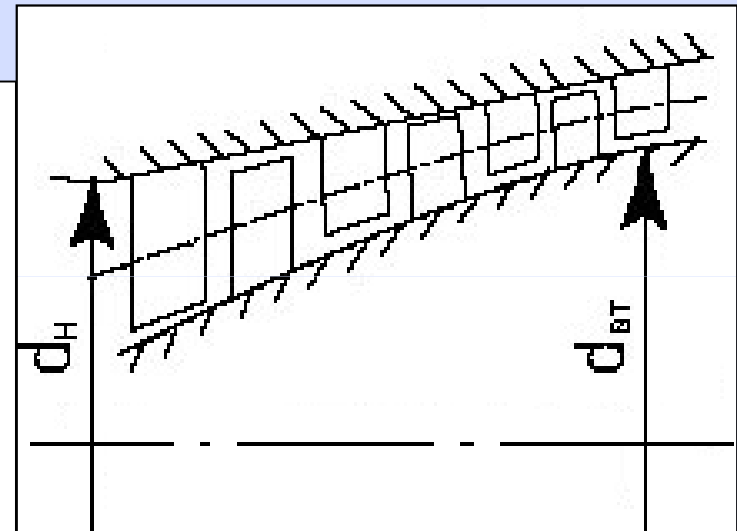
Технологические трудности в изготовлении, связанные с переменностью наружного диаметра и диаметра втулки



## Проточная часть с одновременным увеличением $d_H$ и $d_{BT}$

### Достоинства:

1. Напорность ступеней будет наибольшая в связи с интенсивным возрастанием окружной скорости
2. При такой схеме можно достичь на периферии постоянства числа Маха для всех ступеней и при предельном его значении получить самую короткую конструкцию



### Недостатки:

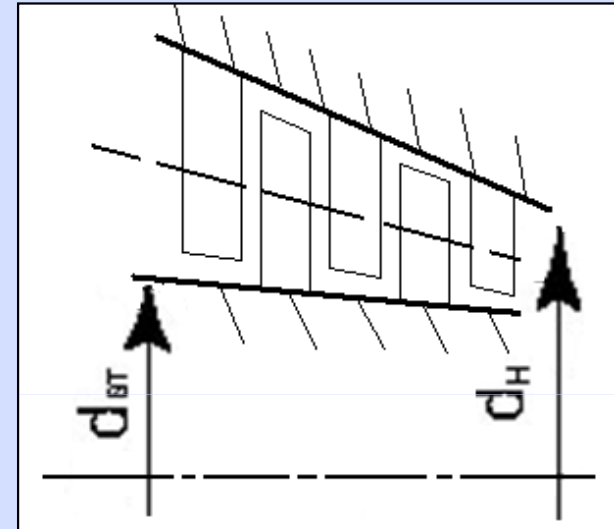
При этом законе имеет место резкое уменьшение длин лопаток **последних** ступеней, что приводит к заметному падению их КПД

Компрессоры большой производительности более 100кг/с

## Проточная часть с одновременным уменьшением $d_H$ и $d_{BT}$

### Достоинства:

1. Конструктивно данная схема может выполняться с лопатками постоянной длины для всех ступеней компрессора
2. Это достигается соответствующим уменьшением диаметров на периферии и у втулки



### Недостатки:

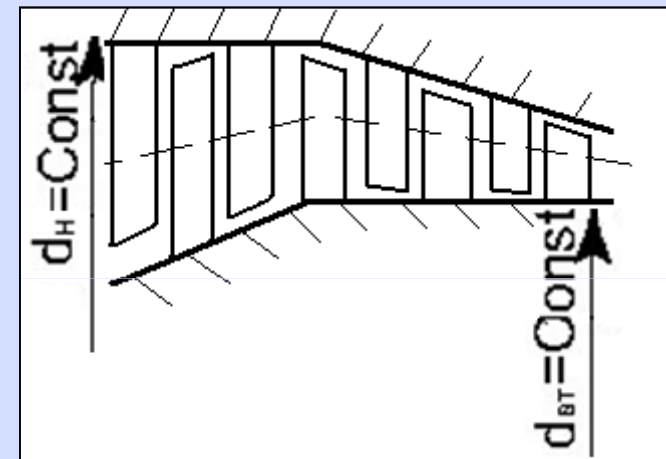
Из-за более резкого падения числа Маха по длине компрессора число его ступеней, а следовательно, осевой размер будут наибольшими по сравнению с предыдущими конструктивными исполнениями проточной части ОК

Компрессоры малой производительности (до 20 кг/с)  
Небольшие степени повышения давления  $\pi_k - до 5$

**Для первых ступеней используют закон  $d_H = \text{const}$ , а для последних – закон  $d_{BT} = \text{const}$**

### **Достоинства:**

При такой схеме удастся сильнее нагрузить средние ступени за счет увеличения окружной скорости, а на последних ступенях - получить приемлемые высоты лопаток



### **Недостатки:**

Комбинированные схемы по сравнению с предыдущими имеют значительную сложность как в аэродинамическом, так и в технологическом отношении

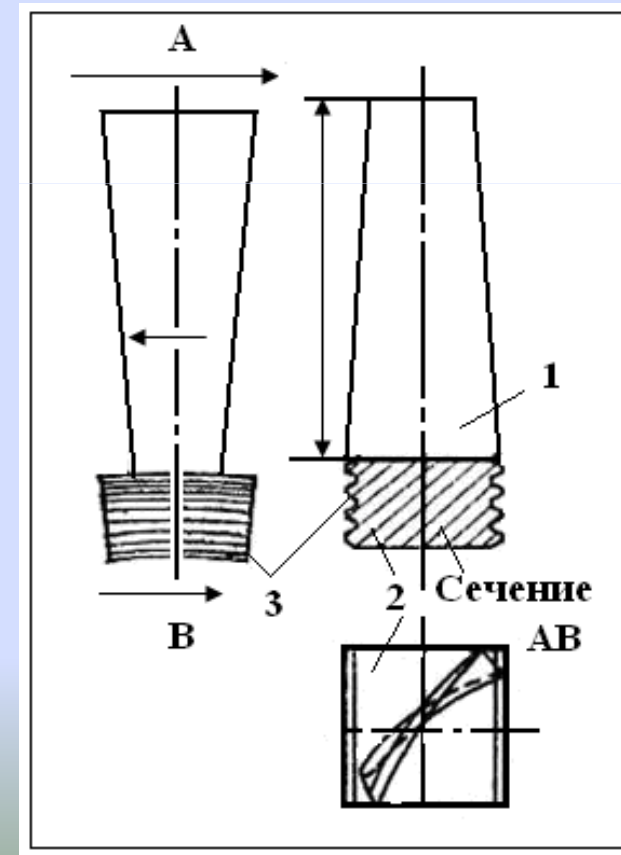
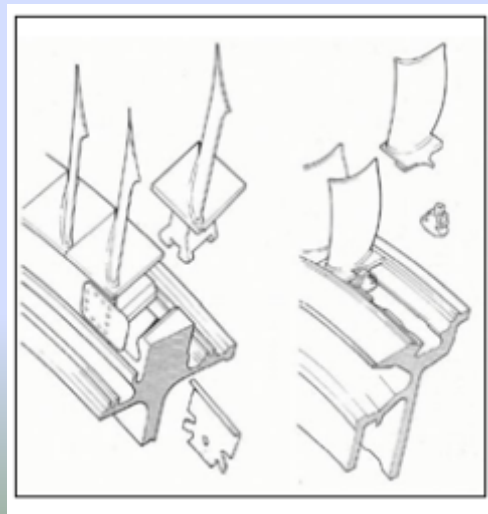
Ограниченное применение

## КРЕПЛЕНИЕ ЛОПАТОК МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ОК

Цель специализированных способов крепления лопаток  
Создание средства крепления, которые создают наименьшую из возможных нагрузку на диск и этим минимизируют общий вес диска

Лопатки ОК обычно рассчитываются и изготавливаются **с переменным по длине углом установки элементов лопасти**, и лопатка получается винтовой

Типовой метод  
фиксирования рабочих  
лопаток на диске  
ротора



## Лопатки ротора (рабочие лопатки)

1. Имеют профилированное сечение, предназначены для создания градиента  $P$  по всей длине лопатки для обеспечения равномерного поля осевых скоростей
2. Большое давление в направлении концов балансирует центробежное действие ротора на поток воздуха

При прохождении потока воздуха через компрессор создается два пограничных слоя медленного или заторможенного слоя воздуха на внутренней и внешней стенках.

Чтобы компенсировать медленное течение воздуха в приграничном слое создается местный прирост в межлопаточном пространстве у конца и у основания лопаток.

**Закручивание лопатки от корневой части, для получения «правильных» углов атаки в каждой точке**



## Лопатки статора (неподвижные направляющие лопатки)

1. Являются **профилированными сечениями** и закреплены в корпусе компрессора или в стопорное кольцо соплового аппарата статора, которое крепится к корпусу
2. Направляющие лопатки часто **собираются в сегменты** на передних ступенях и могут **иметь бандаж внутренних концов** для **минимизации вибраций** от потока длинных лопаток
3. Необходимо закреплять лопатки чтобы они **не вращались по периферии статора**



Методы крепления неподвижных направляющих лопаток на статоре

**Отклонение условий эксплуатации,  
воздействующих на лопатки компрессора от  
расчетных**

**Срыв потока рабочего тела**

**Аэродинамическая вибрация**

**Торможение лопаток**

**Угол атаки воздуха  
относительно рабочей лопатки  
слишком мал (торможение от  
отрицательного угла атаки)**

**Угол атаки воздуха  
относительно рабочей лопатки  
слишком велик (торможение от  
положительного угла атаки)**

**Проблема передних ступеней  
при малых скоростях**

**Проблема задних ступеней  
при высоких скоростях**

**Вибрация лопаток**

**Быстрое разрушение**



# Благодарю за внимание!

## Перечень рекомендуемой литературы по Модулю 4

### Основная:

- Газотурбинные установки: учебное пособие/ А.В. Рудаченко, Н.В. Чухарева, С.С. Байкин.– Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 139с.
- Динамика и прочность турбомашин: учебник для вузов. / А.Г. Костюк –3/е издание перераб. и дополненное.– М.: Издательский дом МЭИ, 2007 – 476с.

### Дополнительная:

- Газотурбинные технологии. Специализированно-аналитический журнал. Изд-во «Медиа Гранд»

