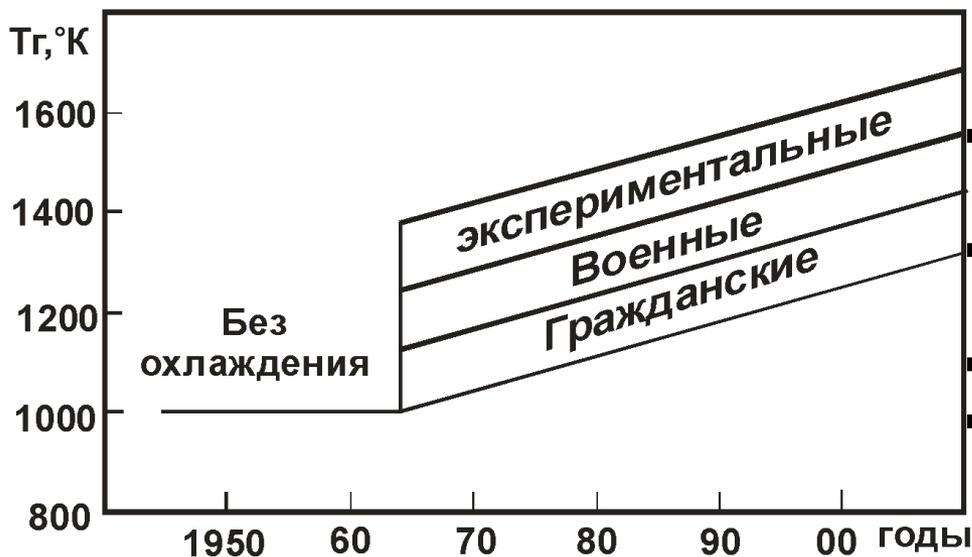


# ОХЛАЖДЕНИЕ ТУРБИН

Цель охлаждения – снизить температуру конструкции до уровня, при котором механические характеристики материала обеспечивают заданный уровень прочности, надежности и ресурса. В турбине охлаждаются следующие основные элементы:

Лопатки (сопловые и рабочие) Диски Опоры

## ОХЛАЖДЕНИЕ ЛОПАТОК



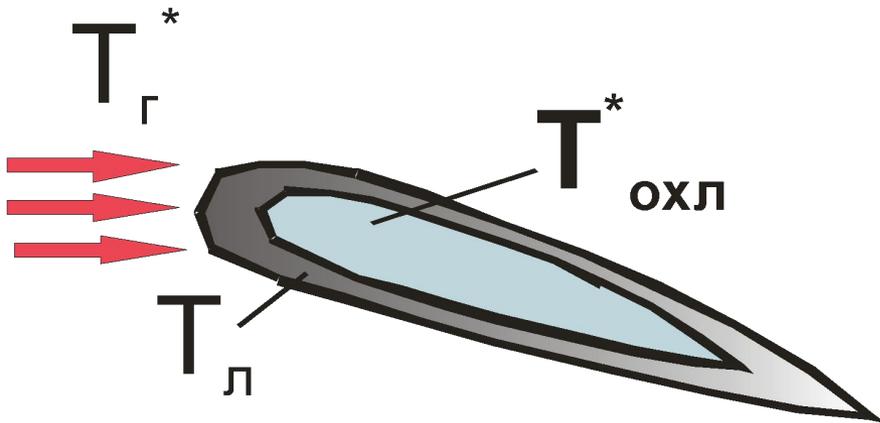
- Высокие значения  $T_g$  достигаются
- Увеличением жаропрочности материала
- Получением литой монокристаллической лопатки
- Применением покрытий
- Применением охлаждения

## НЕДОСТАТКИ ОХЛАЖДЕНИЯ

Однако воздушное охлаждение деталей турбин сопровождается дополнительными потерями, вызываемыми выпуском охлаждающего воздуха в проточную часть турбины, особенно его утечками, а также конструктивными изменениями проточной части (утолщение профиля лопатки СА и РК, введение коммуникаций подвода и т.д.).



# ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМАМ ОХЛАЖДЕНИЯ



## 1. Достаточная эффективность

$$\Theta = \frac{T_{г}^* - T_{л}}{T_{г}^* - T_{охл}^*} \quad T_{г}^*, T_{л}, T_{охл}^*$$

- соответственно температура газа перед ступенью, материала лопатки и охлаждающего воздуха

2 Стабильность и надежность охлаждения в течение всего ресурса

3 Минимальная разность температуры по профилю лопатки.

Сложная форма профиля не позволяет охладить его равномерно.

Поэтому на кромках появляются термонапряжения,

особенно на переходных режимах. Стремятся, чтобы  $\Delta T < 150 \dots 200 \text{K}$ .

4 Минимальный расход воздуха на охлаждение.

5 Минимальная температура охладителя.

6 Минимальные потери давления и хладоресурса

при транспортировке охлаждающего воздуха.

# СПОСОБЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

Существуют два способа охлаждения

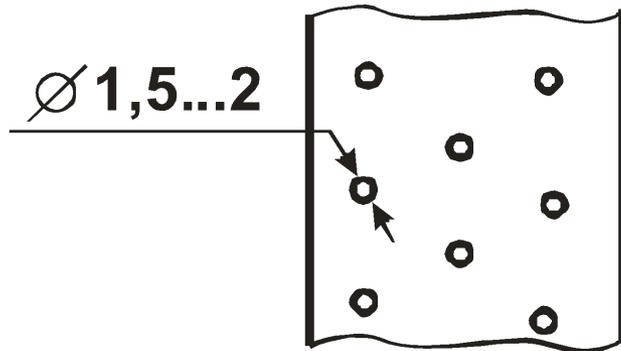
- Конвективный
- Заградительный (пленочный)

Конвективное охлаждение заключается в отборе тепла с окружающей поверхности. Реализуется пропусканием воздуха по каналам внутри тела лопаток. При этом увеличивается скорость протекания охладителя.

Эффективность такого охлаждения можно поднять за счет

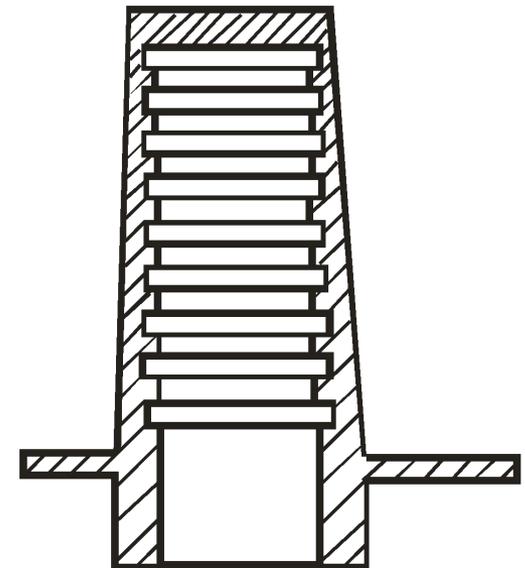
Увеличения площади охлаждающей поверхности

1 Штырьками



Такие схемы увеличивают глубину охлаждения, но возрастает неравномерность температур по профилю лопатки до 200 градусов

2 Применением ребер



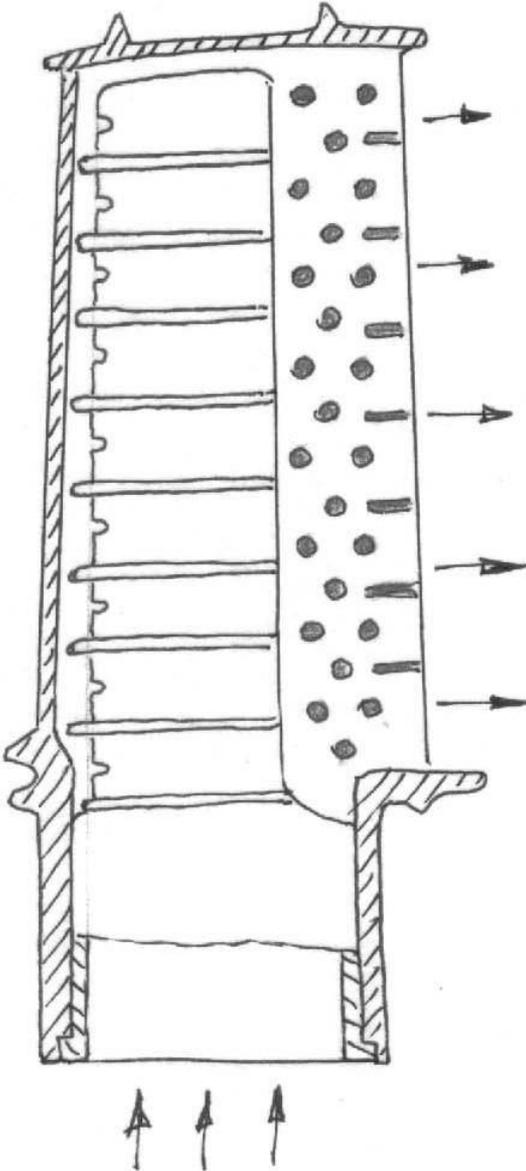
# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВСТАВНОГО ДЕФЛЕКТОРА

## Достоинства

- Обеспечение равномерной температуры по сечению лопатки
- Возможность дифференцированного охлаждения участков лопатки по длине
- Используется как демпфер

## Недостатки

- Форма дефлектора зависит лимитируется размерами хвостовика лопатки
- Износ по контактирующим поверхностям



# КАНАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ

Достоинства

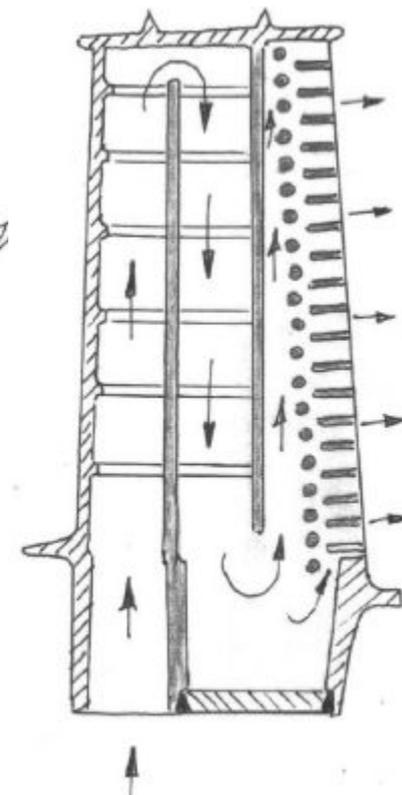
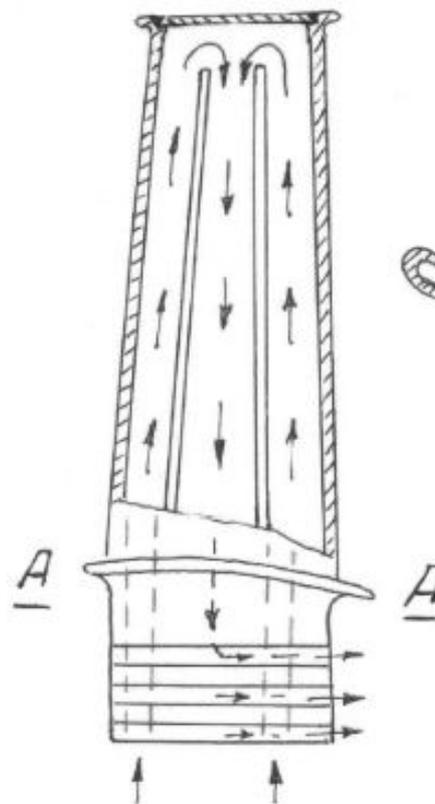
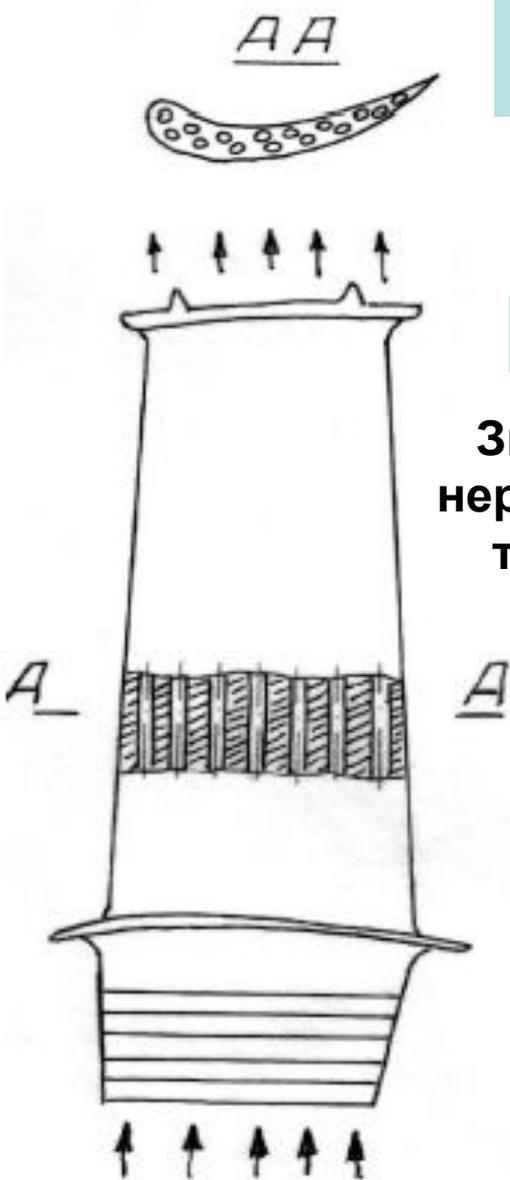
Простая  
технология

Недостатки

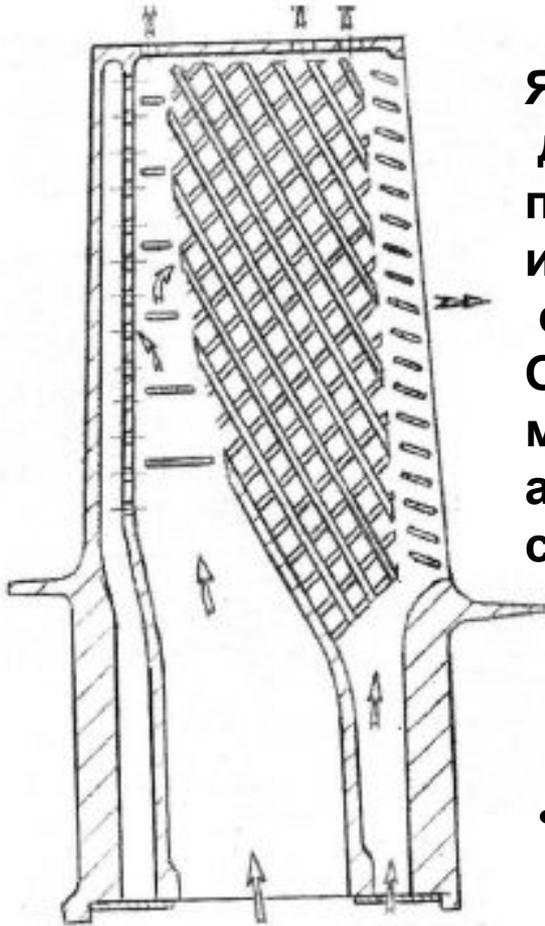
Значительная  
неравномерность  
температуры

Петлевая схема

Схемы отличаются выходом охлаждающего воздуха



# ВИХРЕВАЯ СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ



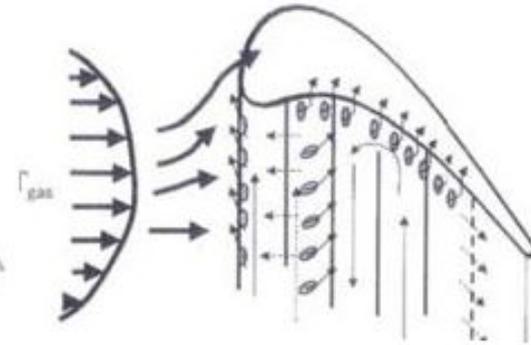
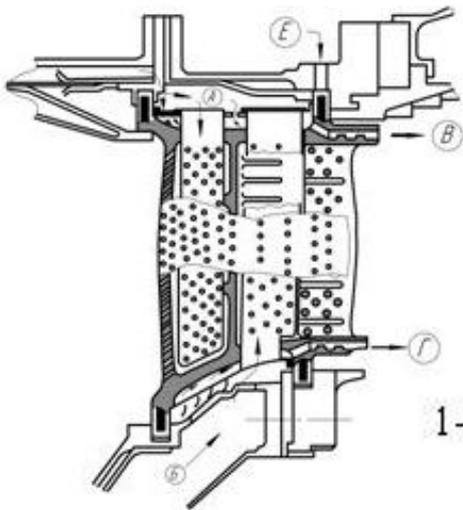
Является наиболее эффективной для современных двигателей. Здесь в качестве поверхности теплообмена внутри лопатки использованы вихревые матрицы с перекрещивающимися каналами. Одно направление движения воздуха организовано между внутренними ребрами на спинке лопатки, а перекрестное – между ребрами на внутренней стороне корытца лопатки.

Глубокое охлаждение стенок лопатки достигается за счет:

- образования вихрей на свободной поверхности перекрещивающихся потоков охлаждающего воздуха
- использования каналов с малым гидравлическим диаметром
- развитой поверхности теплообмена



# КОНВЕКТИВНО-ПЛЕНОЧНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ



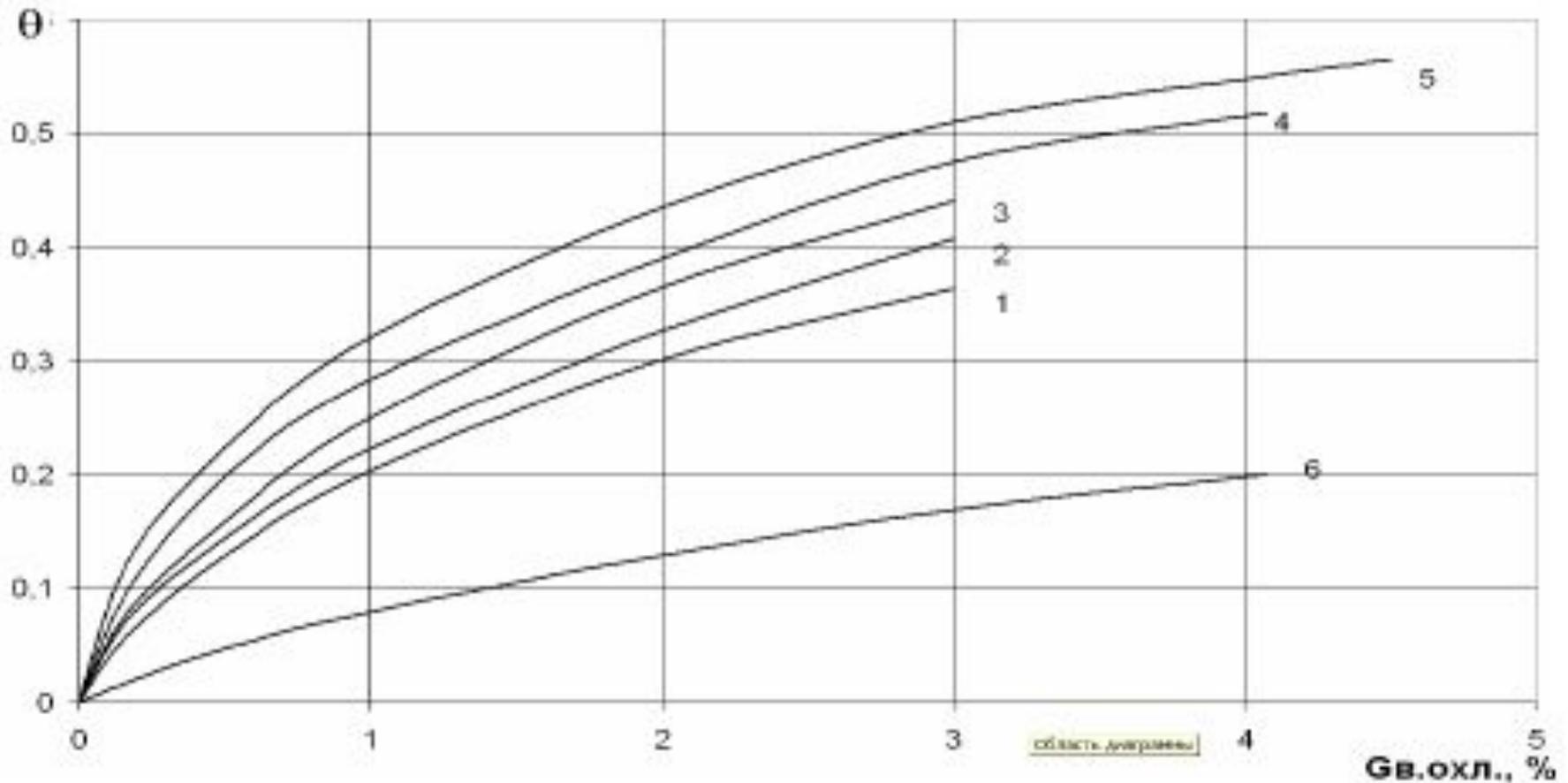
1-я сопловая охлаждаемая лопатка ТРДД RB.211-535 и схема течения воздуха:  
А, Б, В, Г – воздух ВД, Е – воздух НД

Конвективно-пленочное (заградительное охлаждение) заключается в создании слоя воздуха, обтекающего поверхность лопатки и постоянно подпитываемого через отверстия или каналы в теле лопатки. При этом на пути теплового потока образуется барьер в виде пленки воздуха с пониженной температурой. **достоинства**

- повышенная равномерность распределения температуры в лопатке при одновременном увеличении глубины охлаждения.
- удобство реализации – выполняется перфорацией на существующей конструкции **Недостатки**

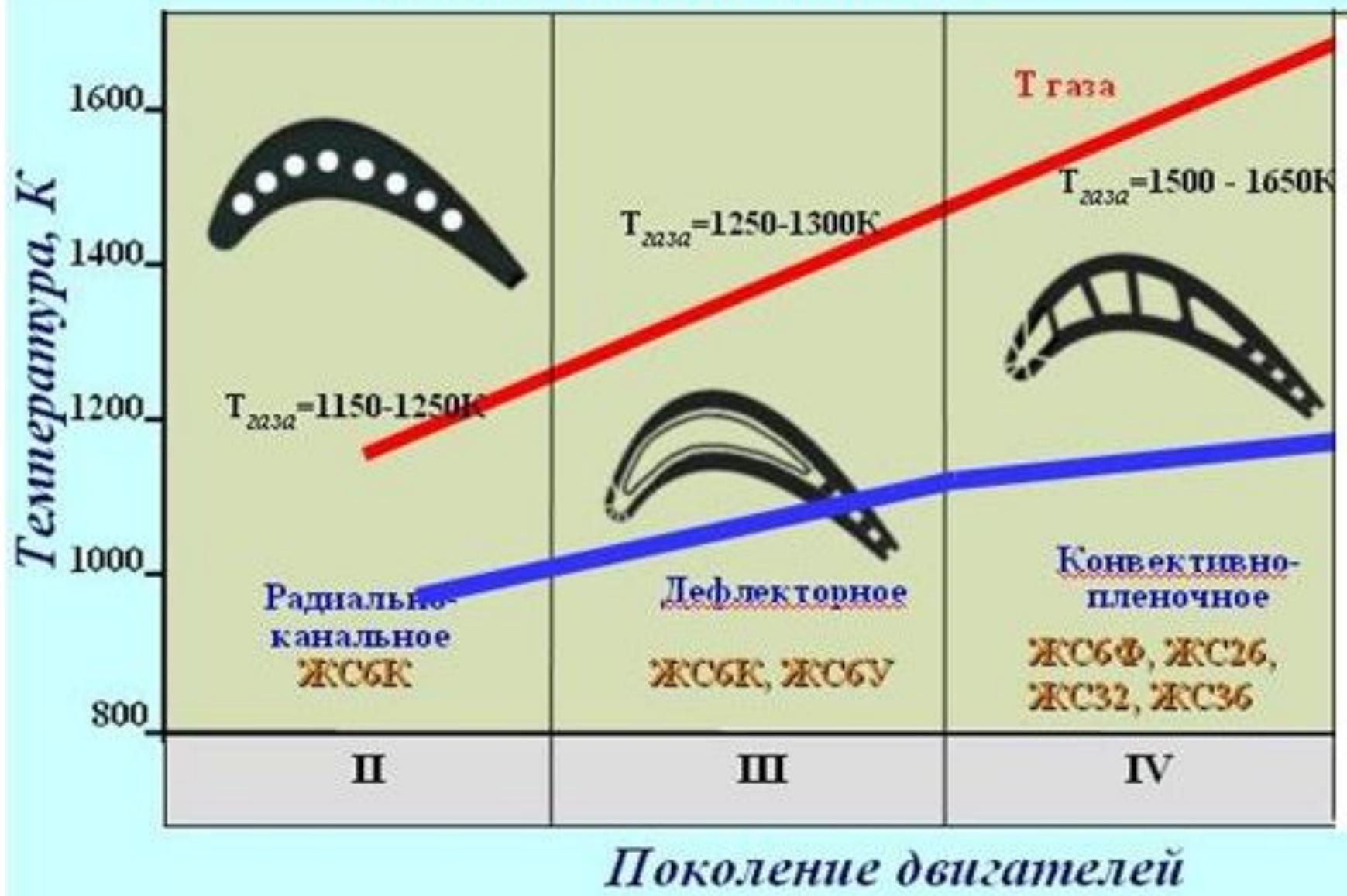
- отверстия снижают усталостную прочность
- ухудшение теплотехнических и гидравлических характеристики из-за засорения перфораций в процессе длительной эксплуатации

# СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК



1 - канальная система охлаждения; 2 - петлевая схема со сбросом охлаждающего воздуха через хвостовик лопатки; 3 - петлевая схема со сбросом охлаждающего воздуха через щель в выходной кромке лопатки; 4 - лопатка со вставным дефлектором; 5 - лопатка с вихревой матрицей; 6 - плёночное охлаждение.

# Уровень работоспособности лопаток с различными системами охлаждения



# ВЫБОР МЕСТА ОТБОРА ВОЗДУХА И ЕГО СПОСОБА ЕГО ТРАНСПОРТИРОВКИ

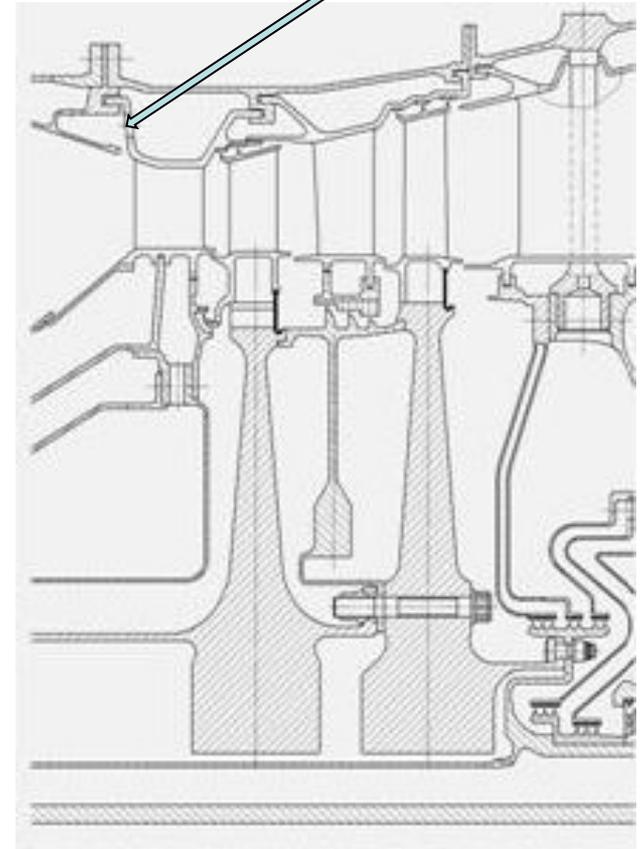
При этом должно выполняться условие, при котором давление  $P$  с учетом потерь было бы на 5...8% больше давления  $P_l$  на поверхности лопаток в месте расположения выходных каналов:

**$P > P_l$  на 5...8%**

**ПОДВОД ВТОРИЧНОГО ВОЗДУХА  
ЧЕРЕЗ СОПЛОВОЙ АППАРАТ**

Желательно, чтобы температура охлаждающего воздуха была минимальной. Выбор номера ступени компрессора для отбора воздуха на охлаждение производится именно из этих соображений.

Поэтому лопатки турбины ВД охлаждаются вторичным воздухом камеры сгорания.



# ОХЛАЖДЕНИЕ ОХЛАЖДАЮЩЕГО ВОЗДУХА

Снижение температуры охлаждающего воздуха позволяет поднять эффективность системы охлаждения

Используются три основных способа

- Подвод через теплообменник
- Использование подкручивающей решетки
- Впрыск воды

## Подвод через теплообменник

Он применяется в тех случаях, когда двигатели эксплуатируются на больших сверхзвуковых скоростях полета и температура воздуха, используемого для охлаждения, значительно возрастает.

Для снижения этой температуры и используется теплообменник.

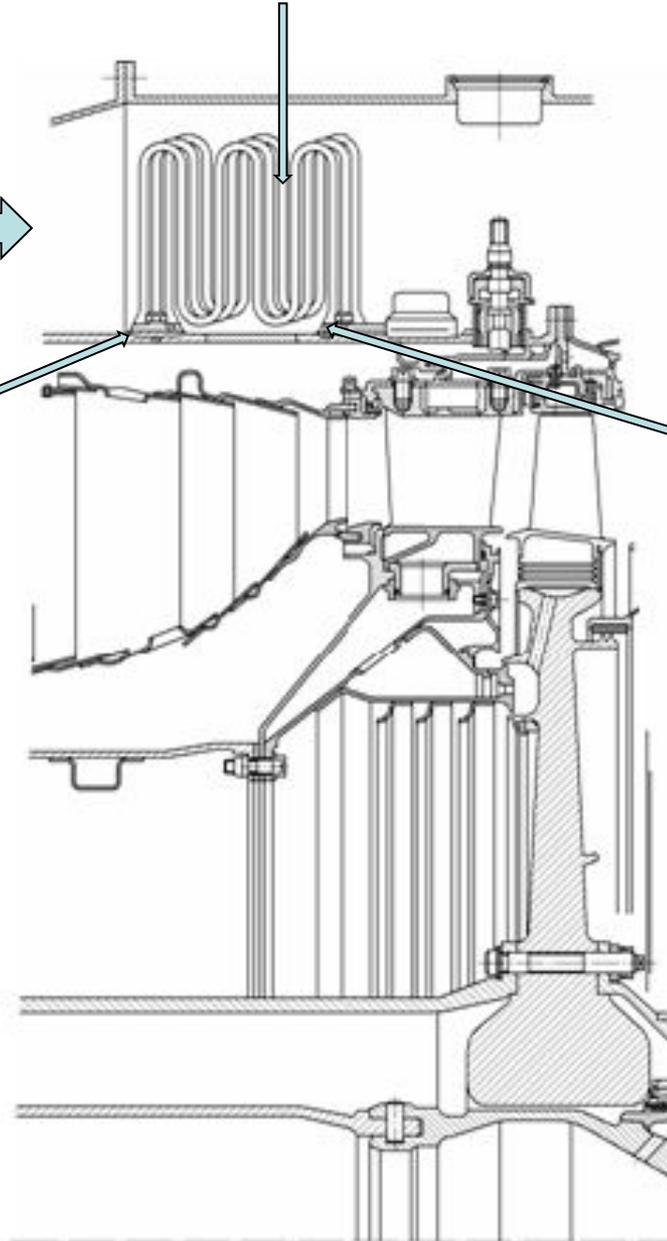
Охладитель в теплообменнике – воздух от воздухозаборника, из-за вентилятора или топливо. Если скорость полета  $M > 2,2$ , то необходимо применение специального турбодетандера для охлаждения воздуха.

# ТЕПЛООБМЕННИК ТРДДФ АЛ-31Ф

ВОЗДУХ ВТОРОГО  
КОНТУРА



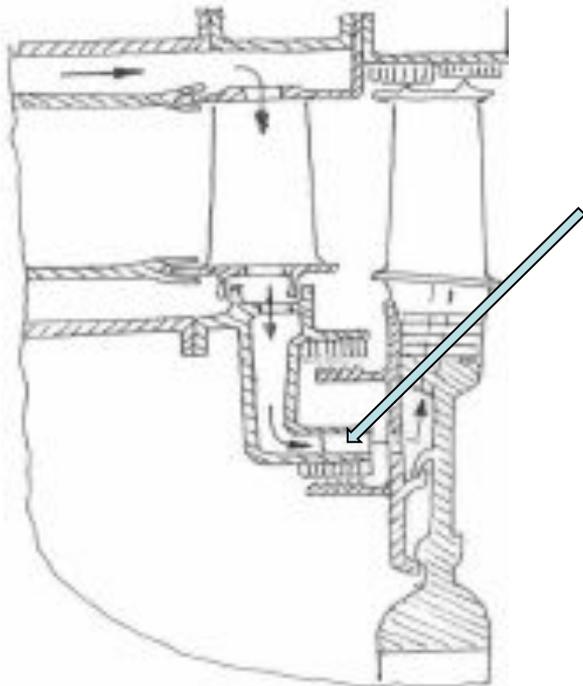
ВХОД ВОЗДУХА  
В ТЕПЛООБМЕННИК



ПОДАЧА  
ОХЛАЖДЕННОГО  
ВОЗДУХА В СА

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОДКРУЧИВАЮЩИХ РЕШЕТОК

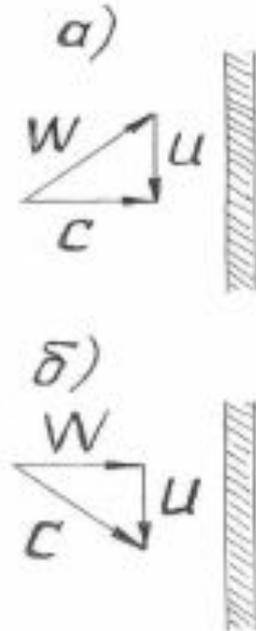
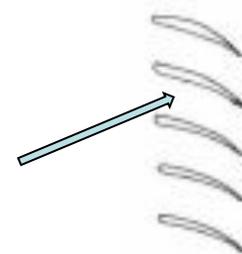
В последнее время нашли широкое применение специальные подкручивающие решетки для охлаждения охлаждающего воздуха. В них используются суживающие каналы, в которых происходит ускорение потока воздуха, за счет чего и повышается эффективность охлаждения



ПОДКРУЧИВАЮЩАЯ  
РЕШЕТКА

$$\Delta T_s = \frac{U^2}{2010}$$

СУЖИВАЮЩИЙСЯ  
КАНАЛ РЕШЕТКИ



- а) - схема натекания на диск потока воздуха без его закрутки,  
б) - натекание на диск закрученного потока воздуха

# **ВПРЫСК ВОДЫ**

**Снижение температуры воздуха происходит за счет ее испарения.**

**Воздух можно охладить не менее, чем на 30 градусов.**

**Метод перспективен, но требует иметь на борту летательного аппарата достаточный запас дистиллированной воды.**

**Частичное отключение подачи охлаждающего воздуха**

**На высотах 11-18 км, где двигатели транспортной авиации вырабатывают основную часть своего ресурса, температура воздуха находится в диапазоне от минус 40 до минус 60 градусов Цельсия, поэтому может быть произведено частичное отключение подачи воздуха. Однако для этого необходимо иметь клапана различной конструкции с соответствующими приводами.**

# ОХЛАЖДЕНИЕ ДИСКОВ

Диски турбины во время работы подвергаются действию центробежных сил от собственных масс и масс лопаток, крутящего момента, перепада давлений и неравномерности нагрева.

При организации охлаждения дисков решаются две задачи:

- Отвод тепла от тела диска
- Уменьшение неравномерности нагрева, снижение теплоперепада между ободом и ступицей, который определяет уровень термических деформаций и напряжений диске

Диски первых ступеней турбины имеют температуру обода 600-900 градусов Цельсия и ступицы 300-600. градиент температур может составлять 200-300 градусов.

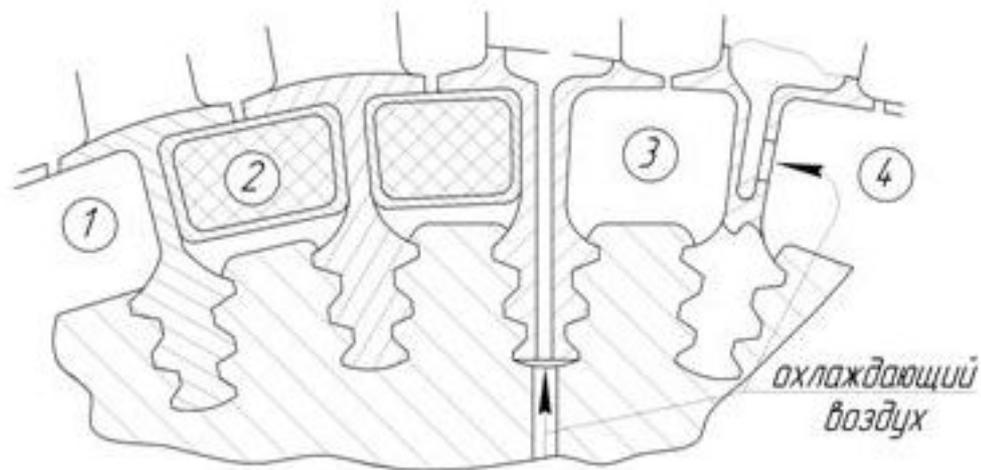
При запуске двигателя обод нагревается быстрее, чем массивная ступица и для достижения стационарного градиента температур (прогрев диска), необходимо достаточно длительное время. Так рабочие лопатки и обод прогреваются в течение **2-6 секунд**, а массивная ступица прогревается за **20-40 минут**, за счет чего и возникают дополнительные термические деформации.



# СНИЖЕНИЕ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА В ОБОД ДИСКА

достигается

- продувкой охлаждающего воздуха через зазоры в замках елочного типа;
- теплоизоляцией обода путем введения в конструкцию рабочей лопатки полки хвостовика и ножки

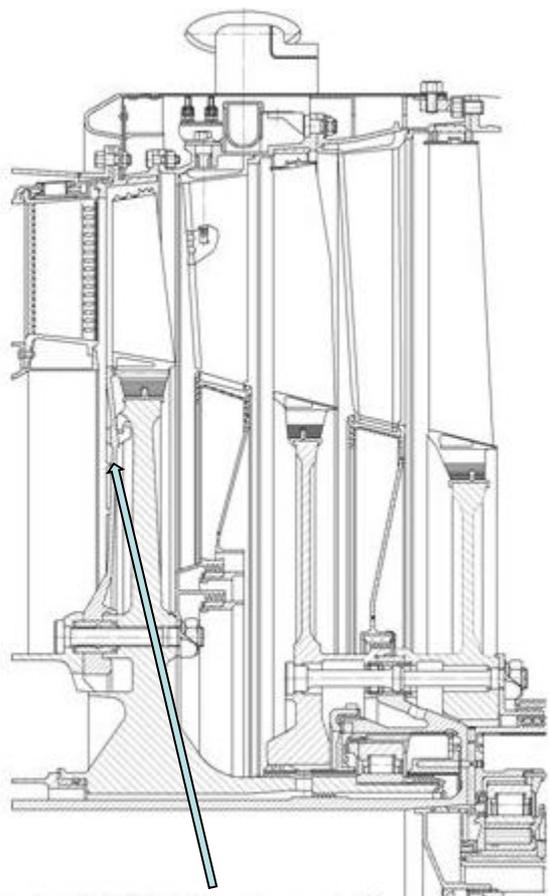


Конструктивные методы уменьшения теплового потока от газа к ободу диска:

- 1 – лопатка с удлиненной ножкой и полкой хвостовика, 2 – изоляция от теплового потока горячего газа, 3 – подвод охлаждающего воздуха через хвостовик и ножку хвостовика, 4 – подвод охладителя через отверстие в ножке

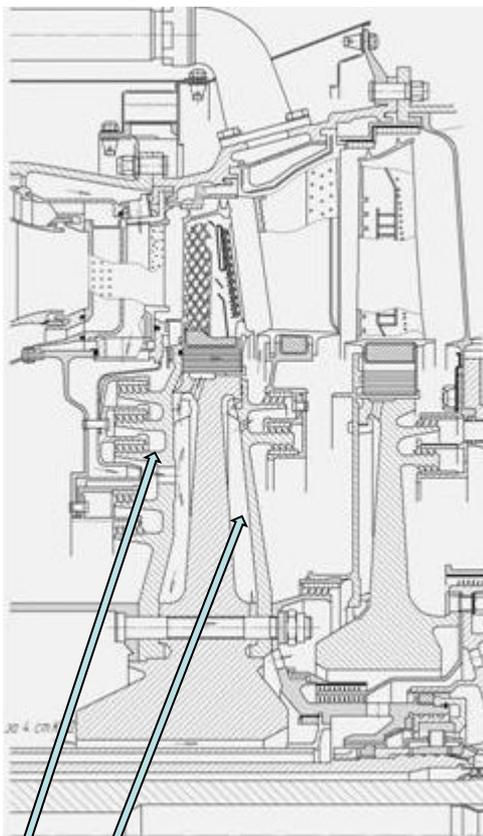
# СХЕМЫ ПОДВОДА ОХЛАЖДАЮЩЕГО ВОЗДУХА К ДИСКУ

подвод  
с дефлектором на диске  
(НК-8)

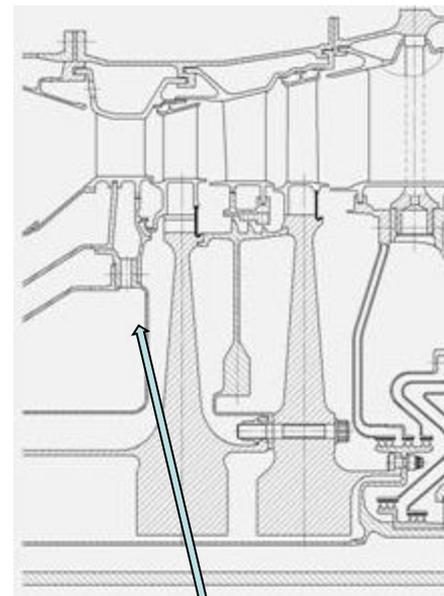


Вращающиеся дефлекторы

подвод  
с двумя дефлекторами  
на диске (НК-56)



подвод  
с невращающимся  
дефлектором (RB432)



Невращающийся  
дефлектор