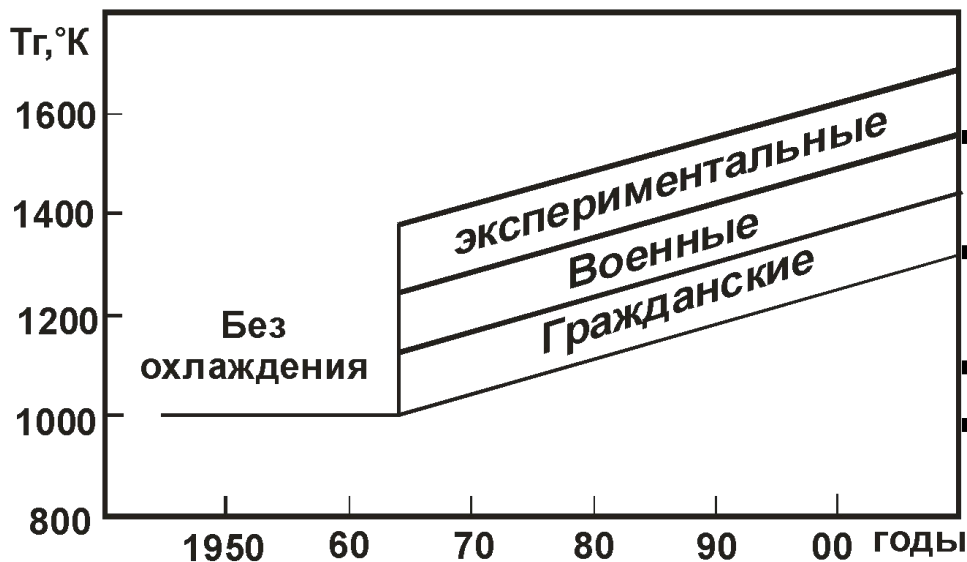


ОХЛАЖДЕНИЕ ТУРБИН

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

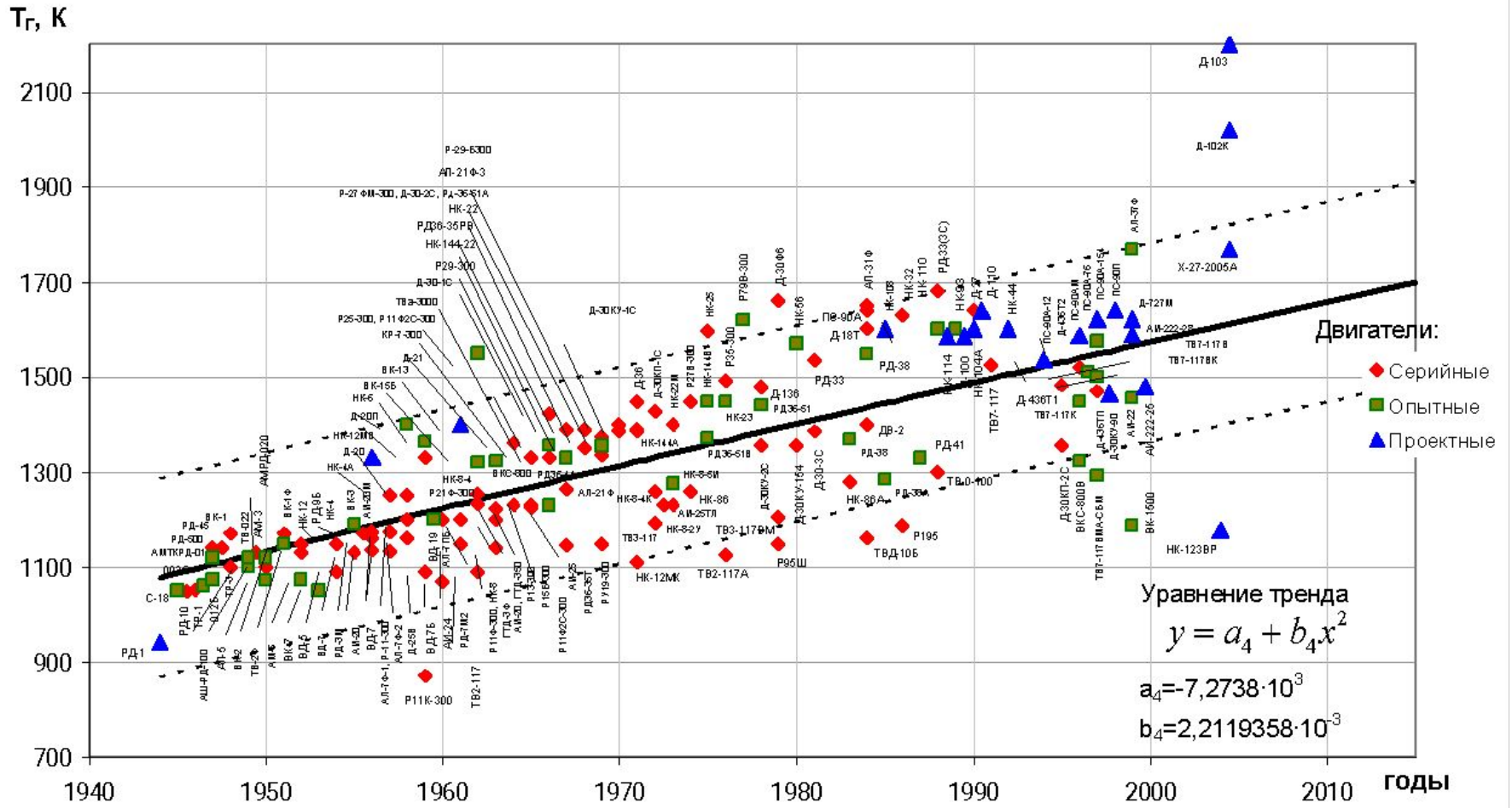


- Высокие значения T_g достигаются
- Увеличением жаропрочности материала
- Получением литой монокристаллической лопатки
- Применением покрытий
- Применением охлаждения

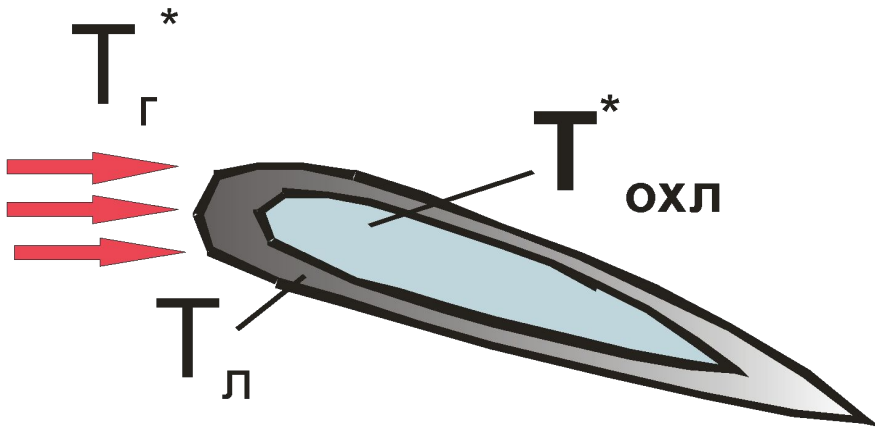
НЕДОСТАТКИ ОХЛАЖДЕНИЯ

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.).

ТЕМПЕРАТУРА ГАЗА ПЕРЕД ТУРБИНОЙ ГТД РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ



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 охлаждать 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

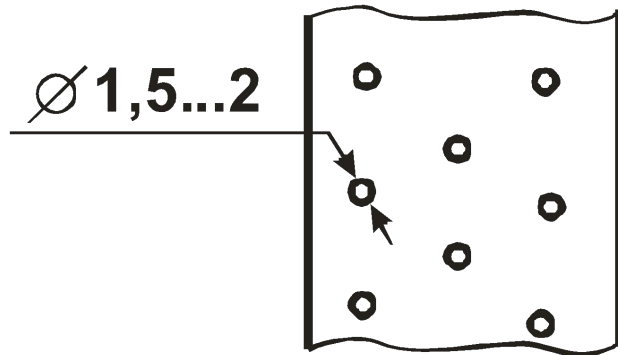
- Конвективный
- Заградительный (пленочный)

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

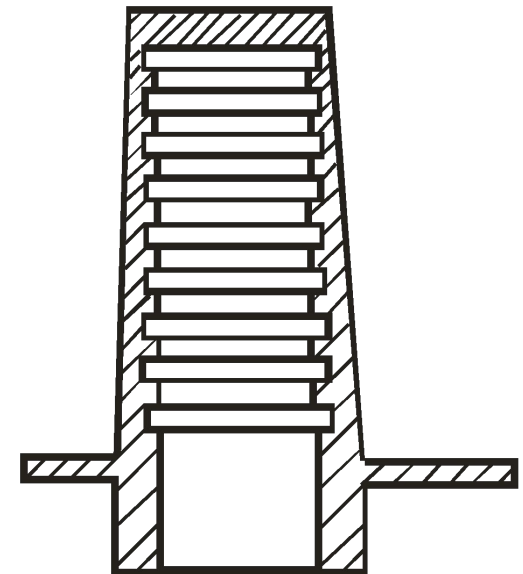
Увеличения площади охлаждающей поверхности

1 Штырьками



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

2 Применением ребер



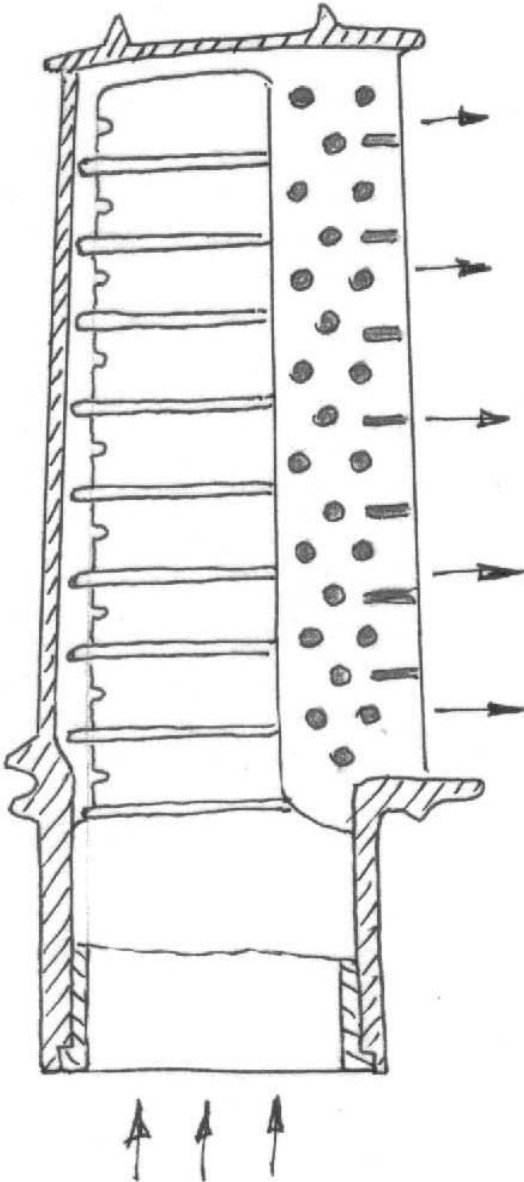
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВСТАВНОГО ДЕФЛЕКТОРА

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

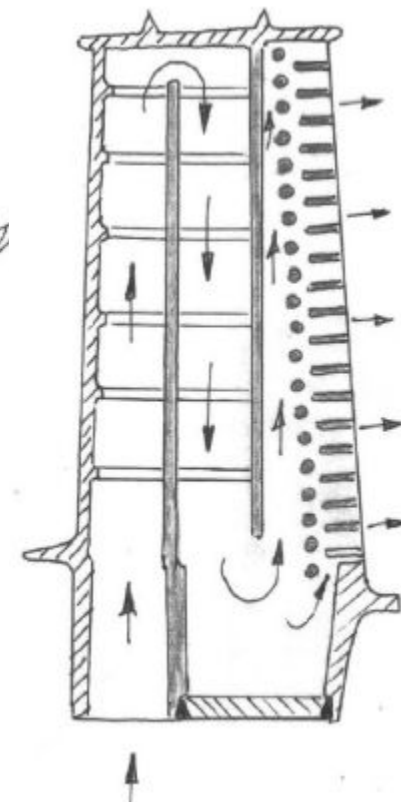
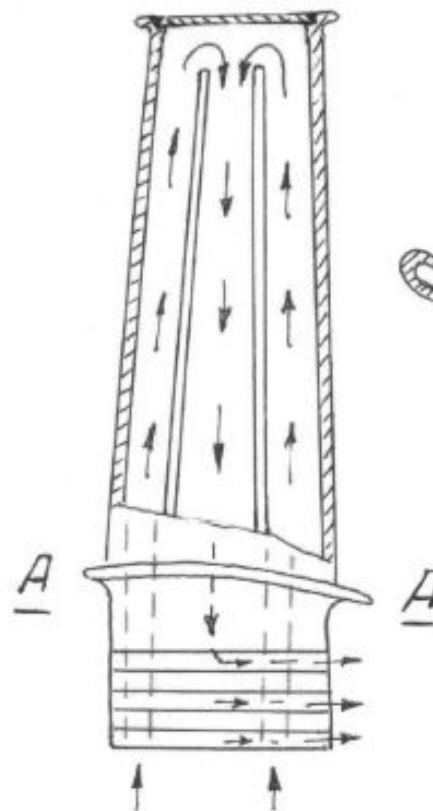
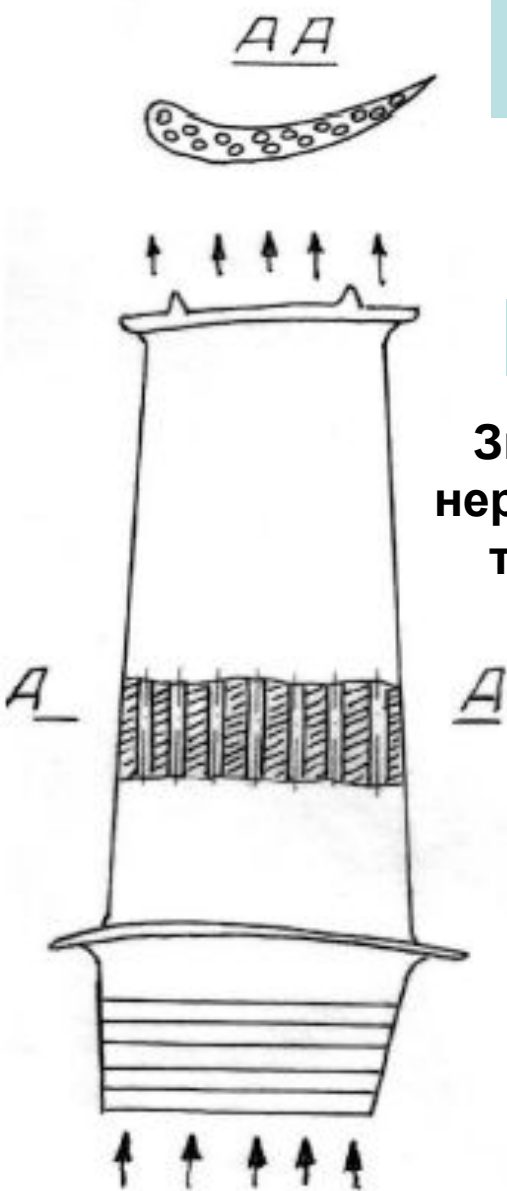
Простая
технология

Недостатки

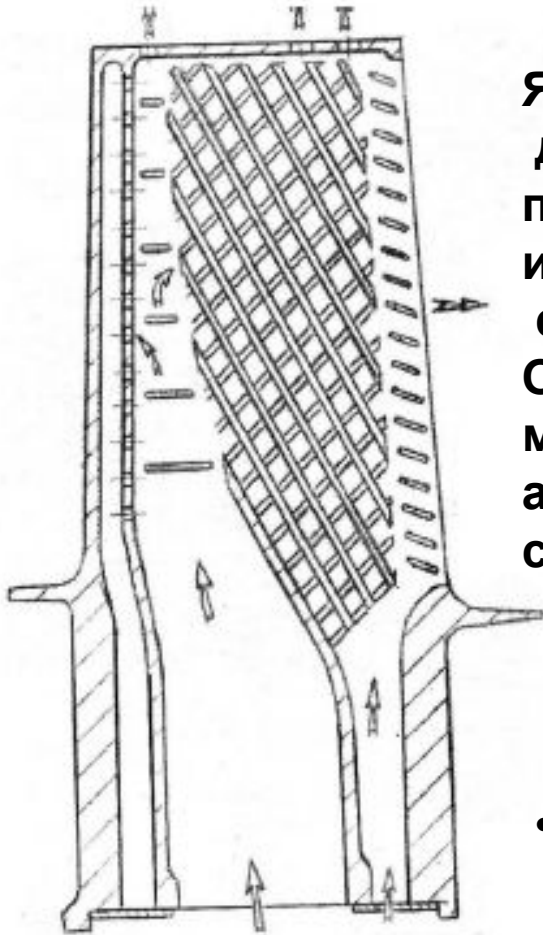
Значительная
неравномерность
температуры

Петлевая схема

Схемы отличаются выходом охлаждающего воздуха



ВИХРЕВАЯ СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ



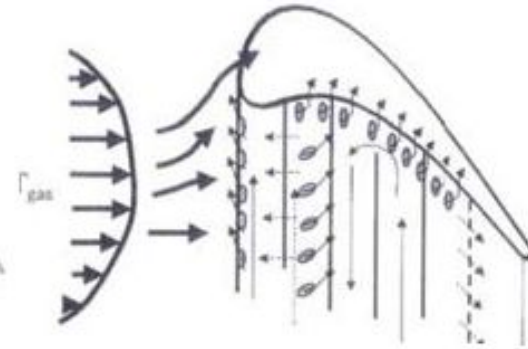
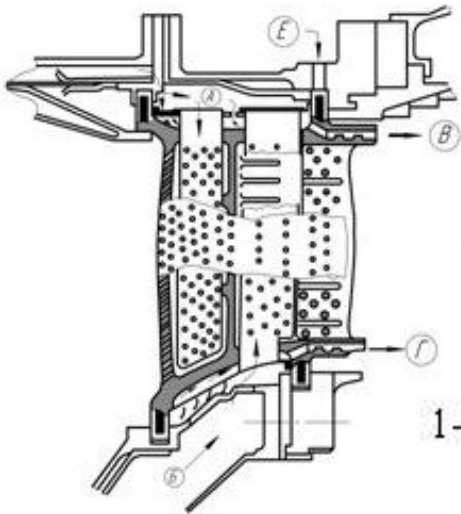
Является наиболее эффективной для современных двигателей. Здесь в качестве поверхности теплообмена внутри лопатки использованы вихревые матрицы с перекрещивающимися каналами. Одно направление движения воздуха организовано между внутренними ребрами на спинке лопатки, а перекрестное – между ребрами на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



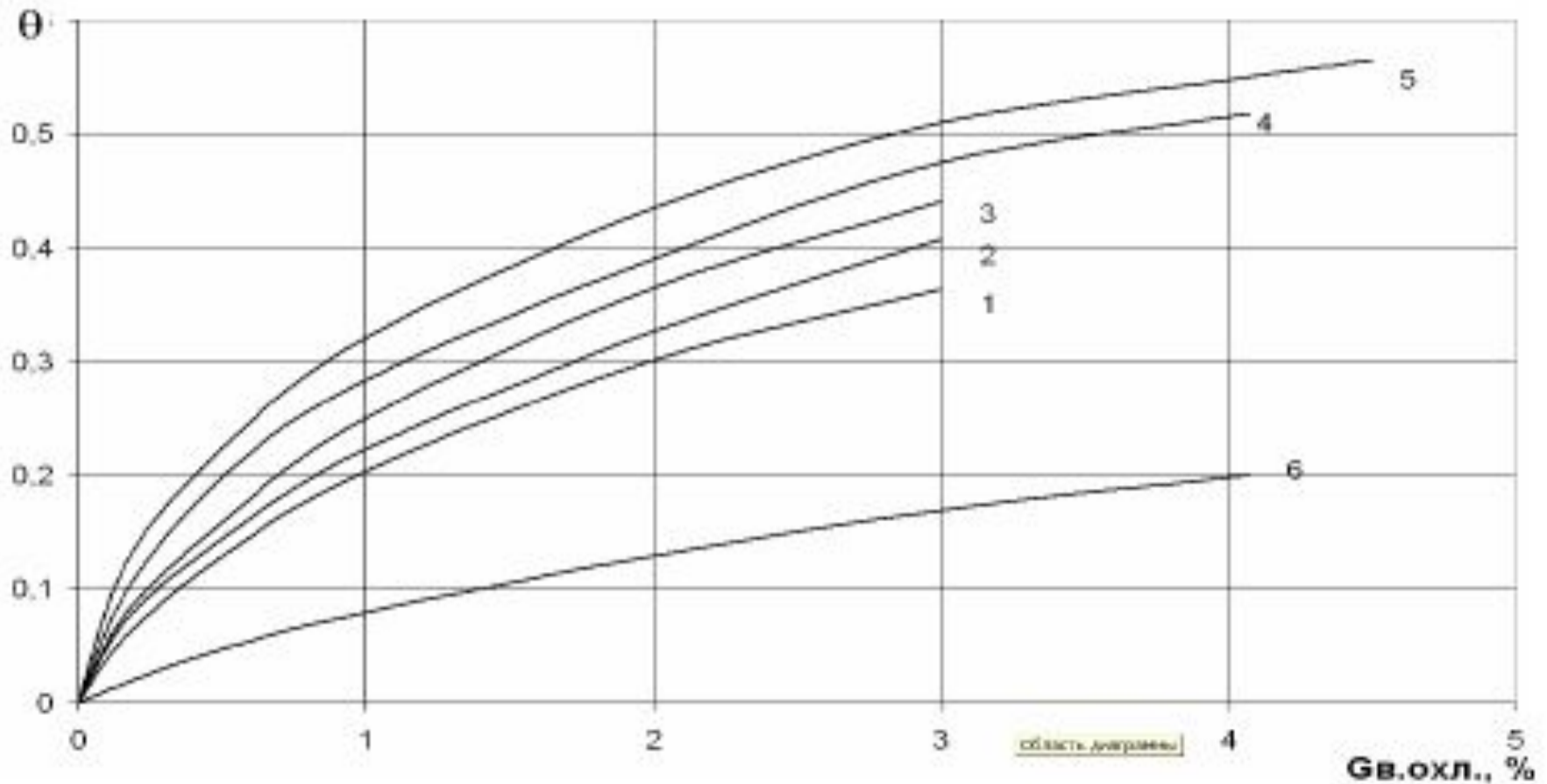
1-я сопловая охлаждаемая лопатка ТРДД RB.211-535 и схема течения воздуха:
А, Б, В, Г – воздух ВД, Е – воздух НД

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**

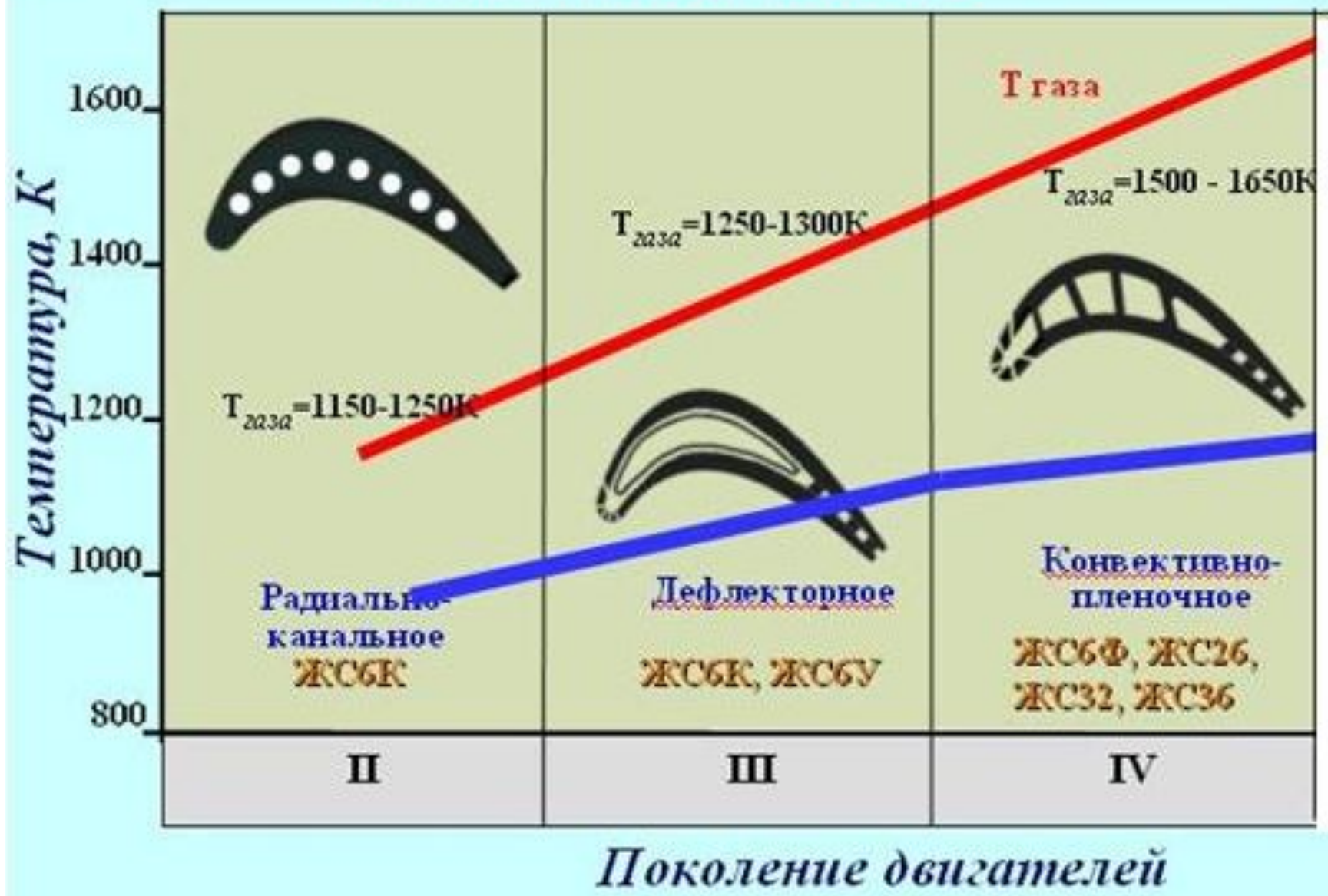
- отверстия снижают усталостную прочность
- ухудшение теплотехнических и гидравлических характеристики из-за засорения перфораций в процессе длительной эксплуатации

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

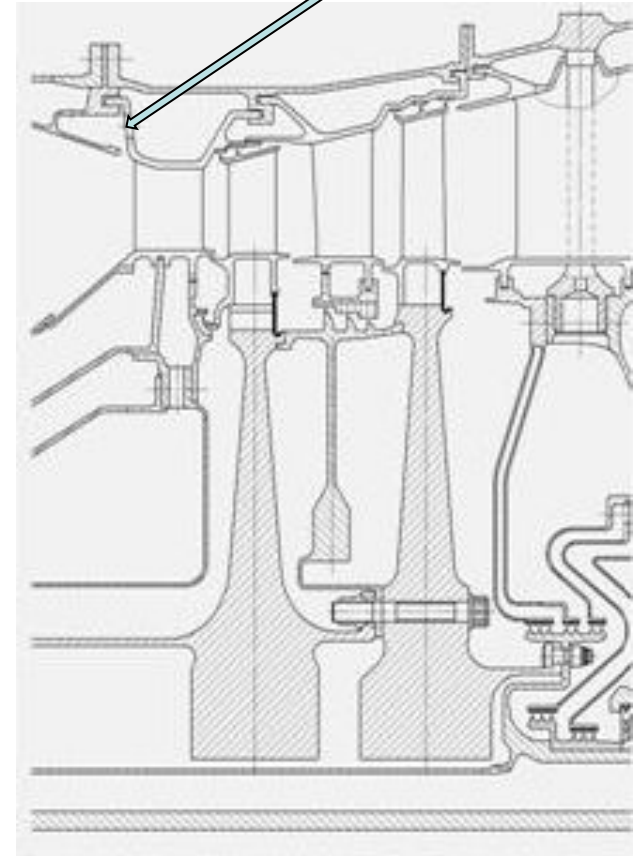
При этом должно выполняться условие, при котором давление P с учетом потерь было бы на 5...8% больше давления P_l на поверхности лопаток в месте расположения выходных каналов:

$$P > P_l \text{ на } 5...8\%$$

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.

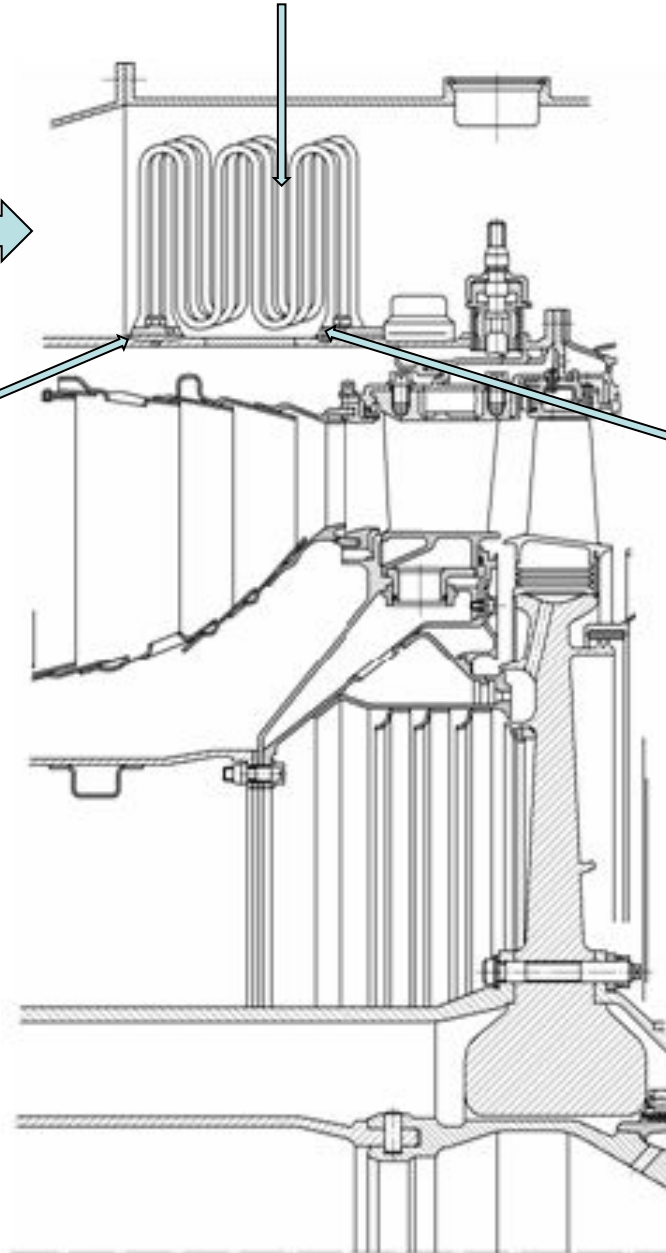
Охладитель в теплообменнике – воздух от воздухозаборника, из-за вентилятора или топливо. Если скорость полета $M > 2,2$, то необходимо применение специального турбодетандера для охлаждения воздуха.

ТЕПЛООБМЕННИК ТРДДФ АЛ-31Ф

ВОЗДУХ ВТОРОГО
КОНТУРА



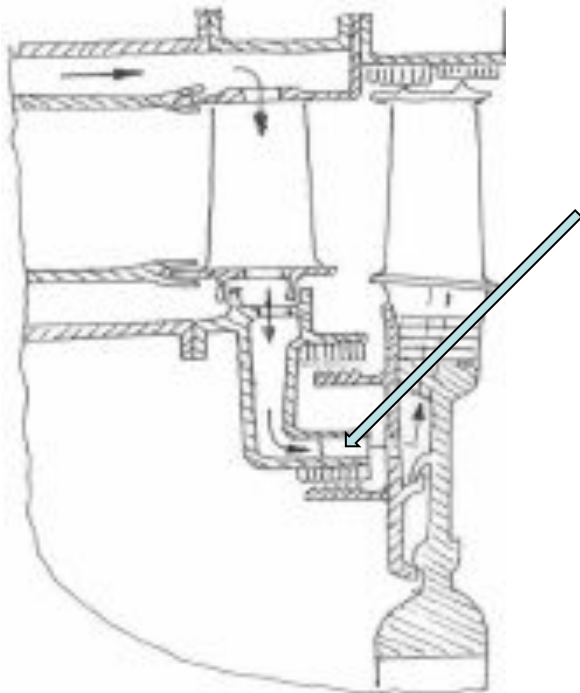
ВХОД ВОЗДУХА
В ТЕПЛООБМЕННИК



ПОДАЧА
ОХЛАЖДЕННОГО
ВОЗДУХА В СА

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОДКРУЧИВАЮЩИХ РЕШЕТОК

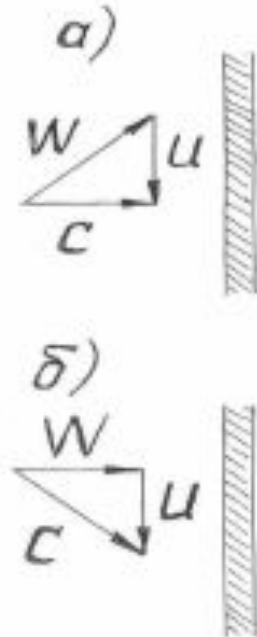
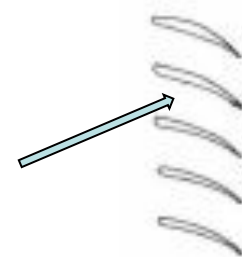
В последнее время нашли широкое применение специальные подкручивающие решетки для охлаждения охлаждающего воздуха. В них используются суживающие каналы, в которых происходит ускорение потока воздуха, за счет чего и повышается эффективность охлаждения



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.

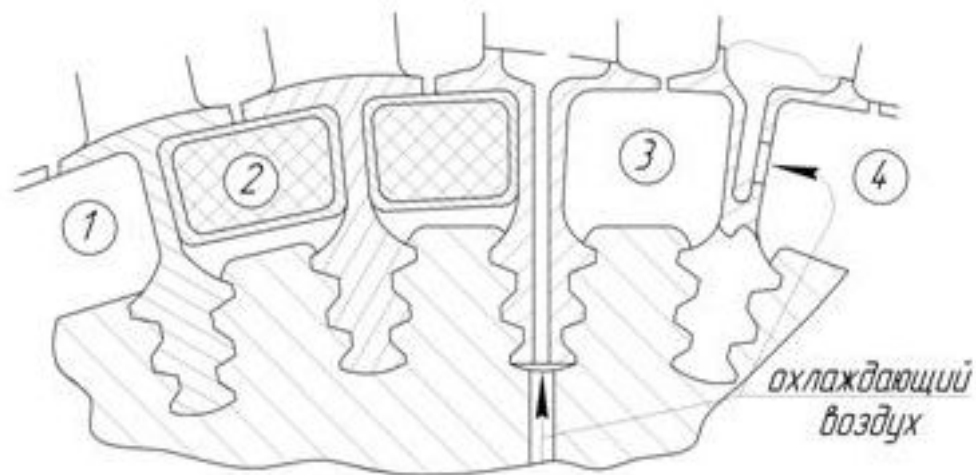
При запуске двигателя обод нагревается быстрее, чем массивная ступица и для достижения стационарного градиента температур (прогрев диска), необходимо достаточно длительное время. Так рабочие лопатки и обод прогреваются в течение **2-6 секунд**, а массивная ступица прогревается за **20-40 минут**, за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

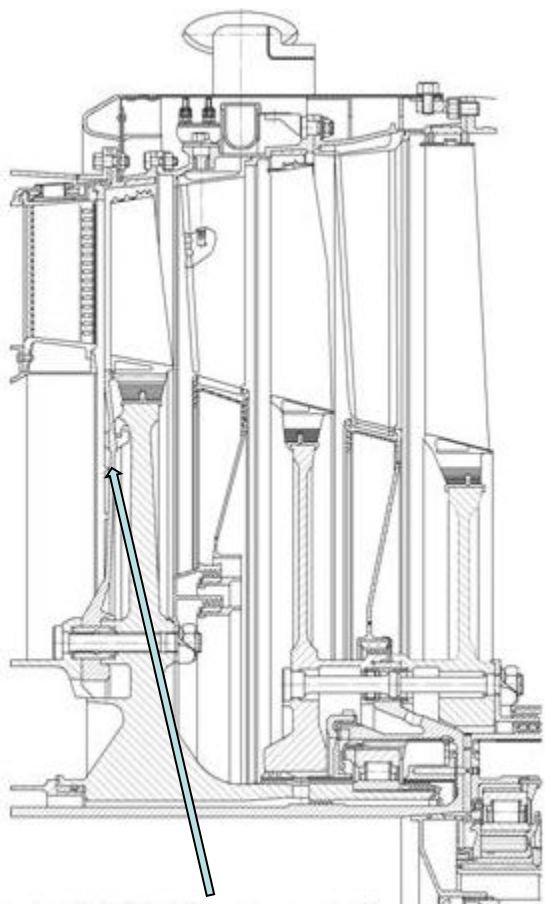


Конструктивные методы уменьшения теплового потока от газа к ободу диска:

- 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)

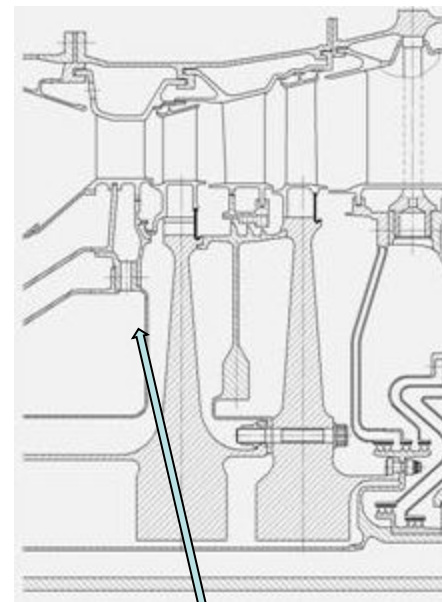


Вращающиеся дефлекторы

подвод
с двумя дефлекторами
на диске (НК-56)



подвод
с невращающимся
дефлектором (RB432)



Невращающийся
дефлектор