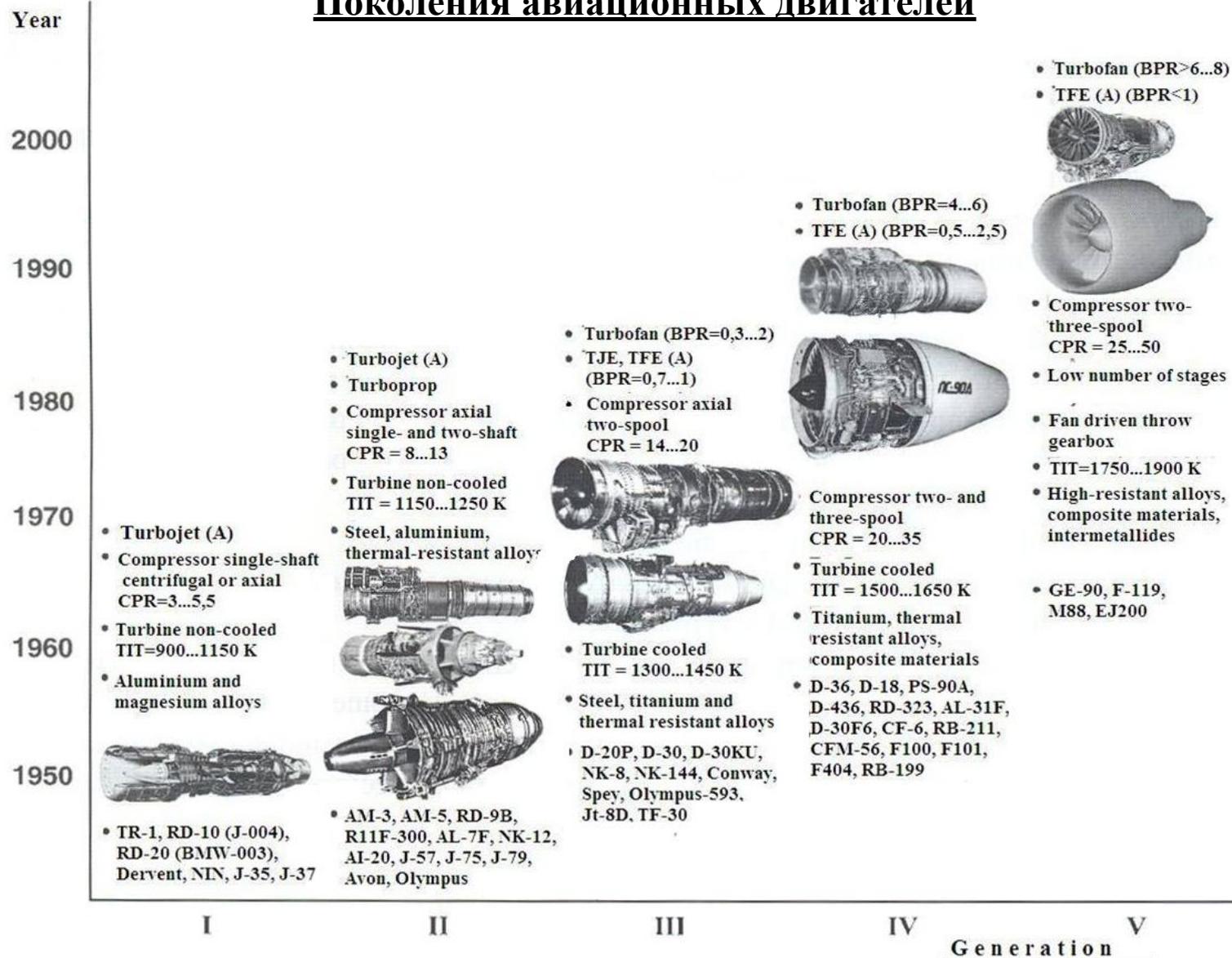


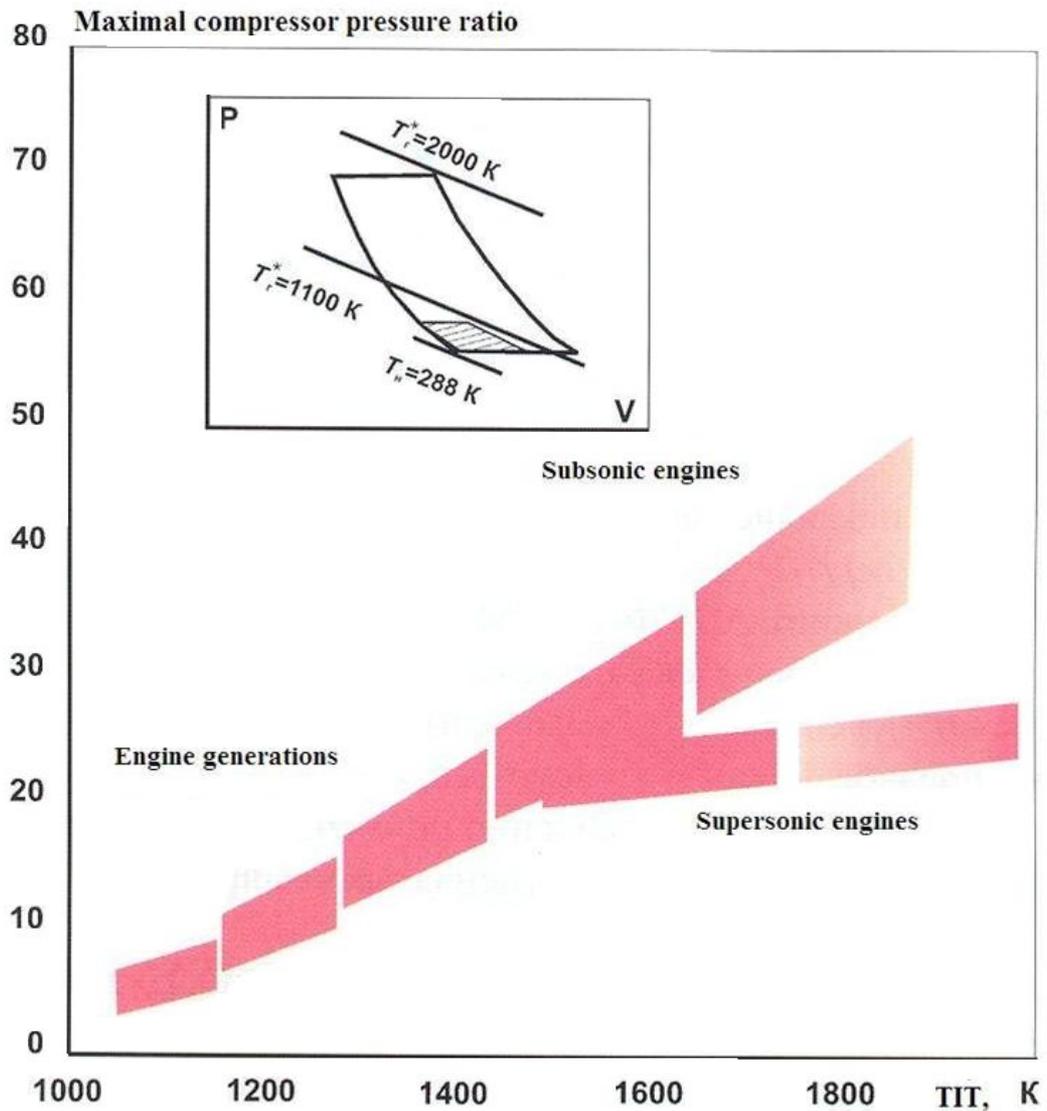
ВЛИЯНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТУРБИН НА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВО И РЕСУРС

Поколения авиационных двигателей



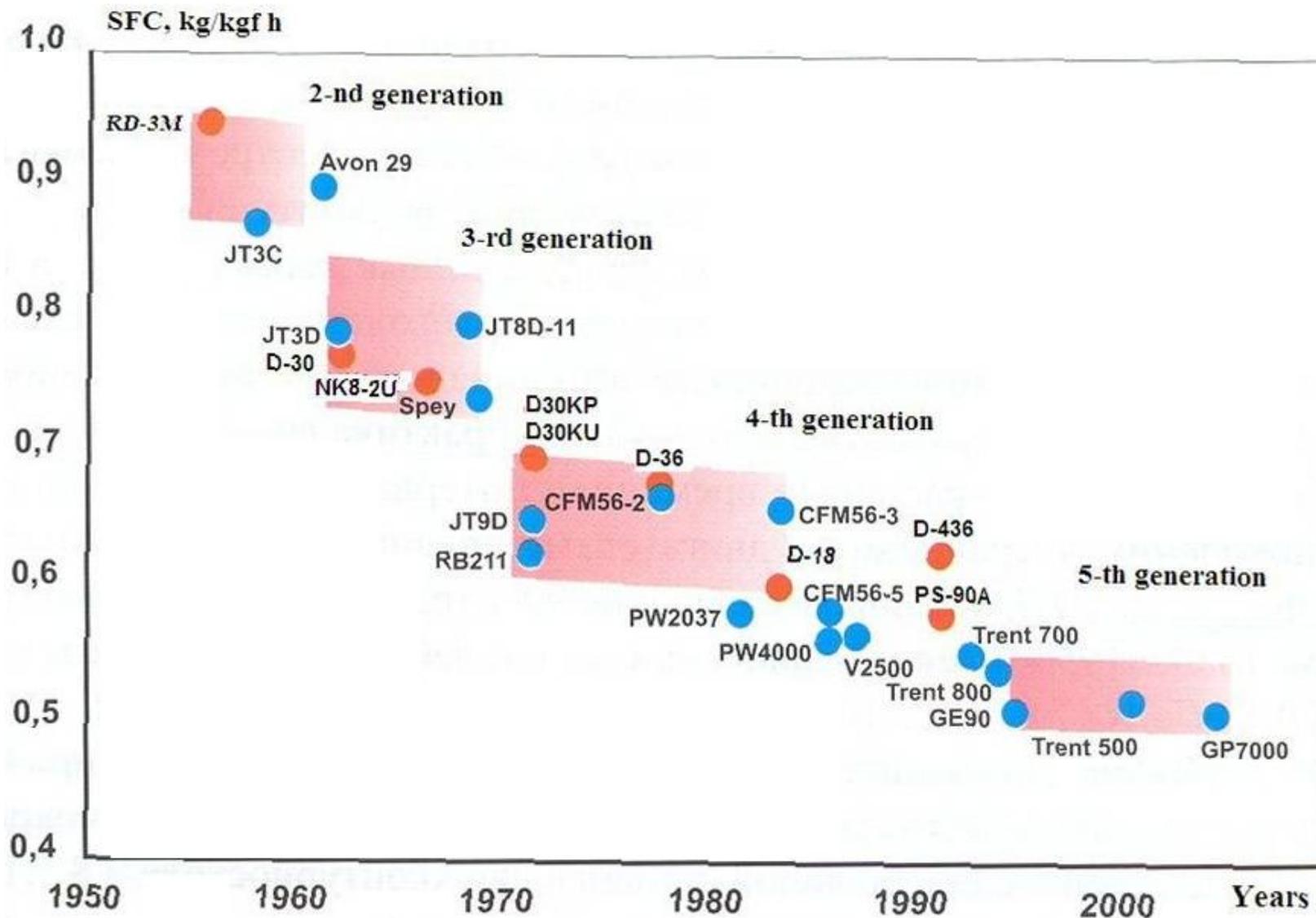
ВЛИЯНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТУРБИН НА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВО И РЕСУРС

Термодинамические параметры авиационных двигателей



ВЛИЯНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТУРБИН НА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВО И РЕСУРС

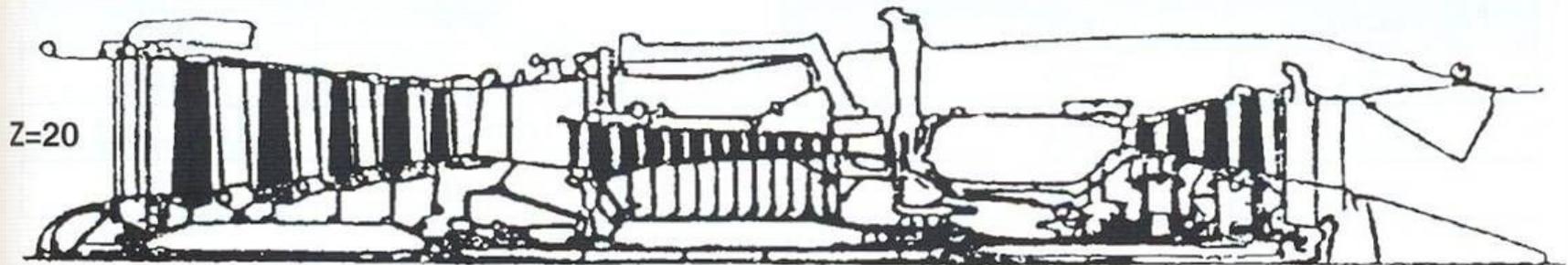
Изменение удельного расхода топлива



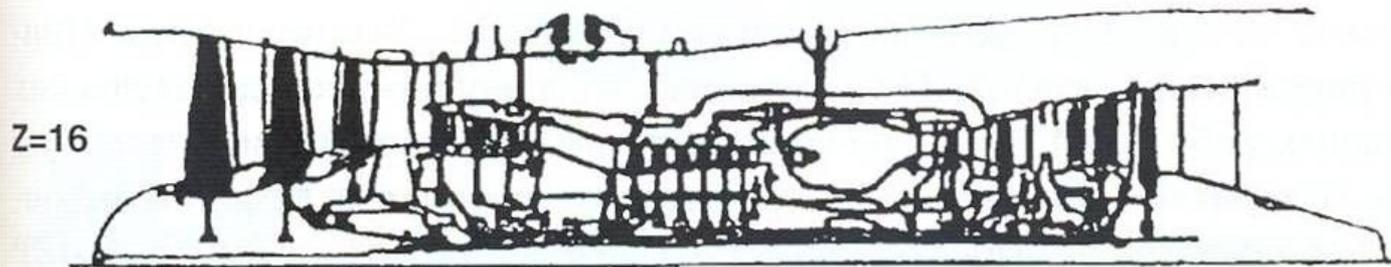
ВЛИЯНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТУРБИН НА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВО И РЕСУРС

Эволюция конструктивной схемы авиационных двигателей

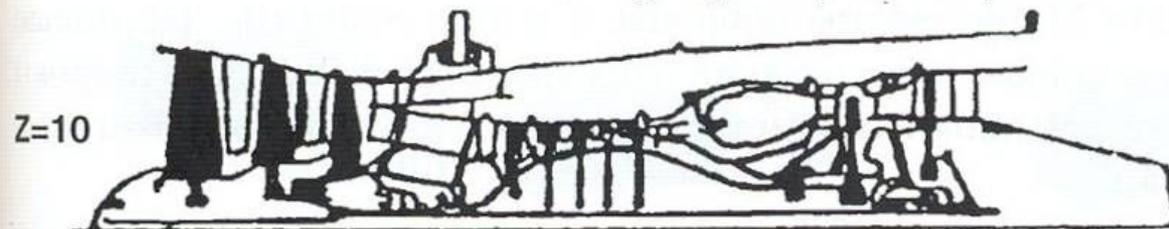
3-rd generation (60-th)



4-th generation (70-80-th)



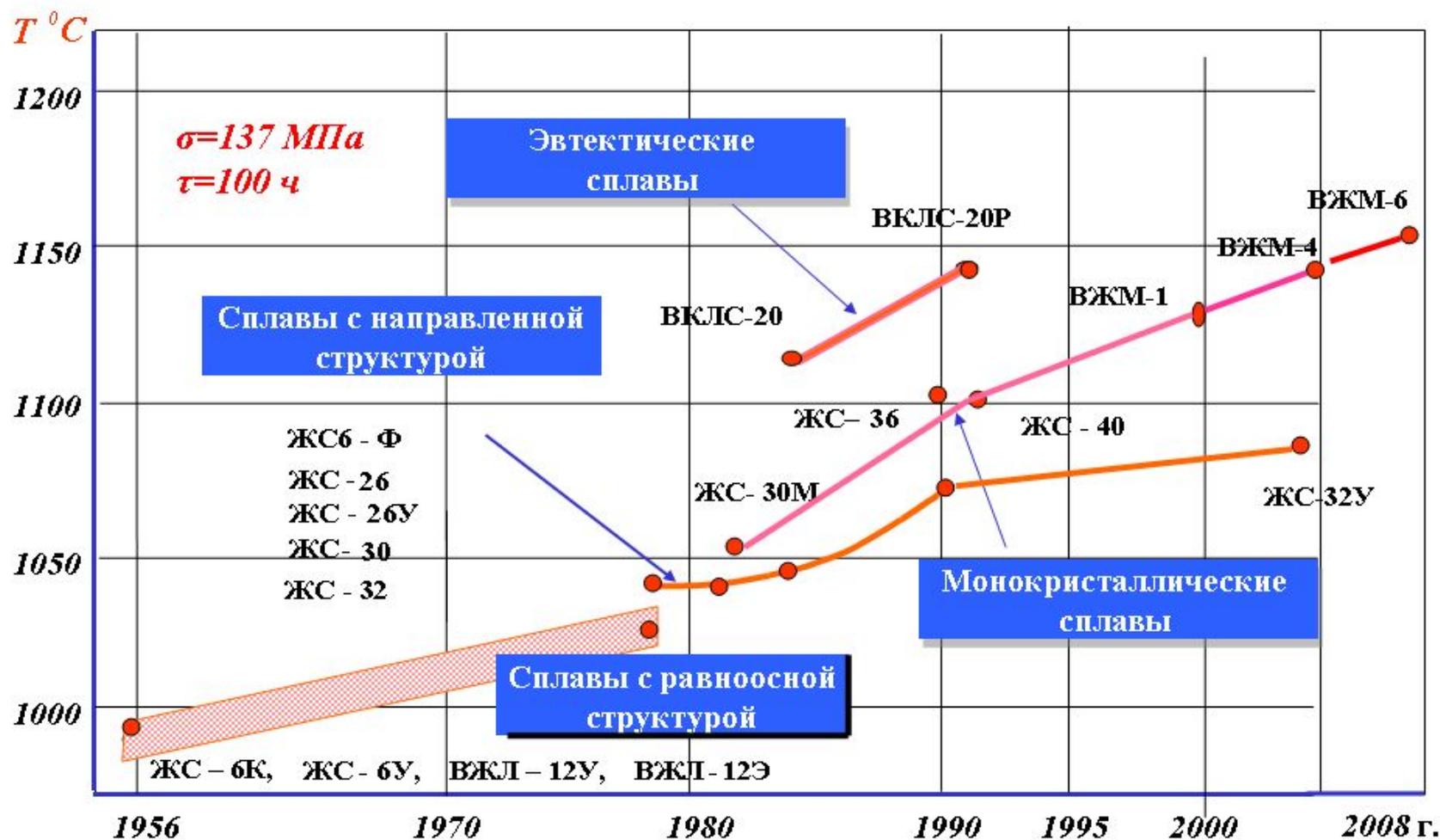
5-th generation (from 90-th)



ВЛИЯНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТУРБИН НА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВО И РЕСУРС

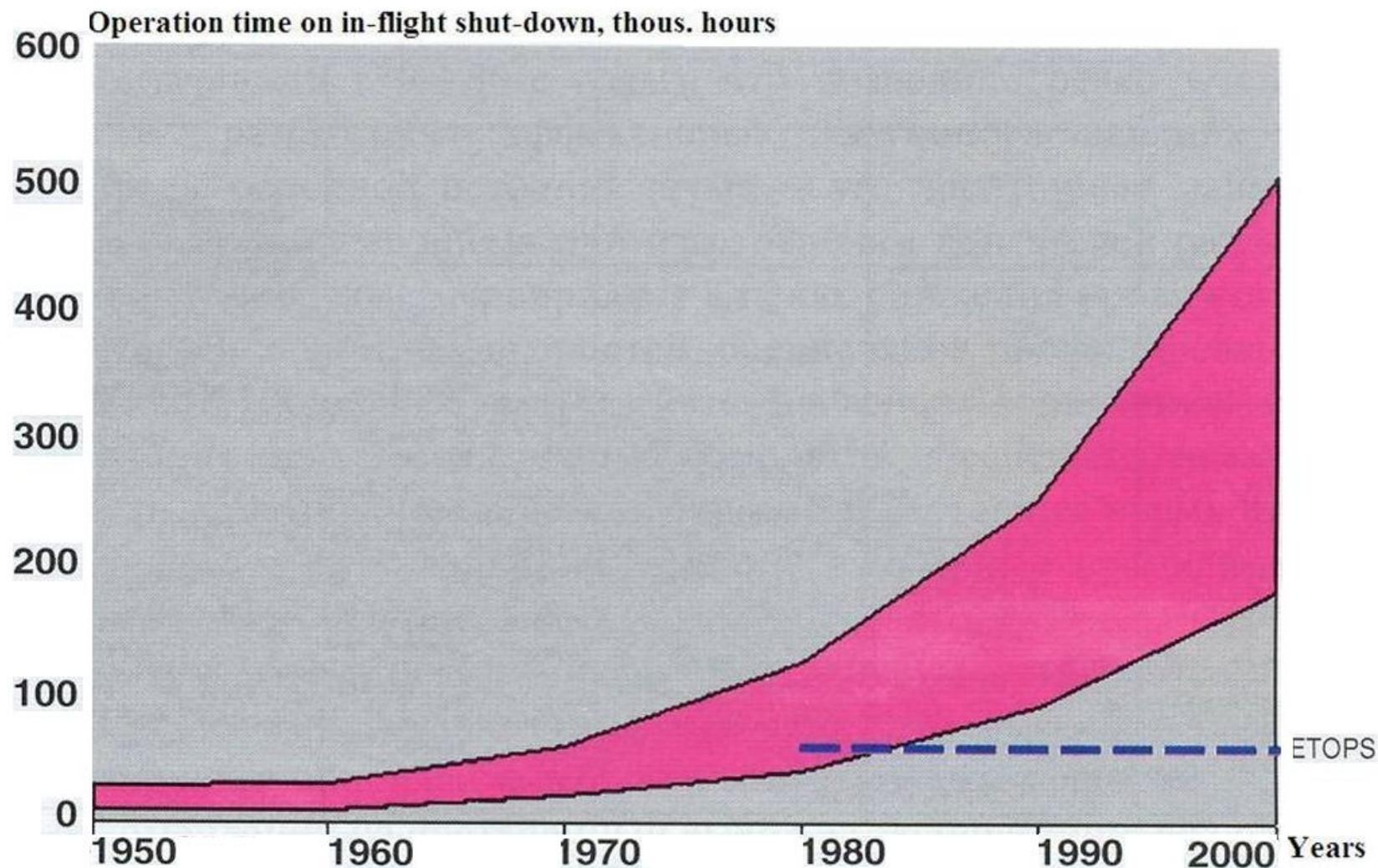


Температурный уровень работоспособности литейных жаропрочных сплавов



ВЛИЯНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТУРБИН НА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВО И РЕСУРС

Изменение показателей надежности двигателей



ВЛИЯНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТУРБИН НА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВО И РЕСУРС

Требования к системам охлаждения

1. Обеспечение надежной работы элементов двигателя, работающих в условиях повышенных нагрузок и температур.

2. Минимальные затраты энергии на охлаждение. Чтобы снизить энергию, расходуемую на охлаждение, необходимо:

- использовать как можно меньше охлаждающего воздуха;

- использовать воздух с возможно меньшим давлением;

- сократить утечки воздуха из каналов охлаждения на пути от мест отбора до охлаждаемых деталей;

- снижать гидравлическое сопротивление каналов, по которым движется охлаждающий воздух.

3. Обеспечение как можно более равномерного температурного поля охлаждаемых деталей.

Температурная неравномерность

Температурные напряжения

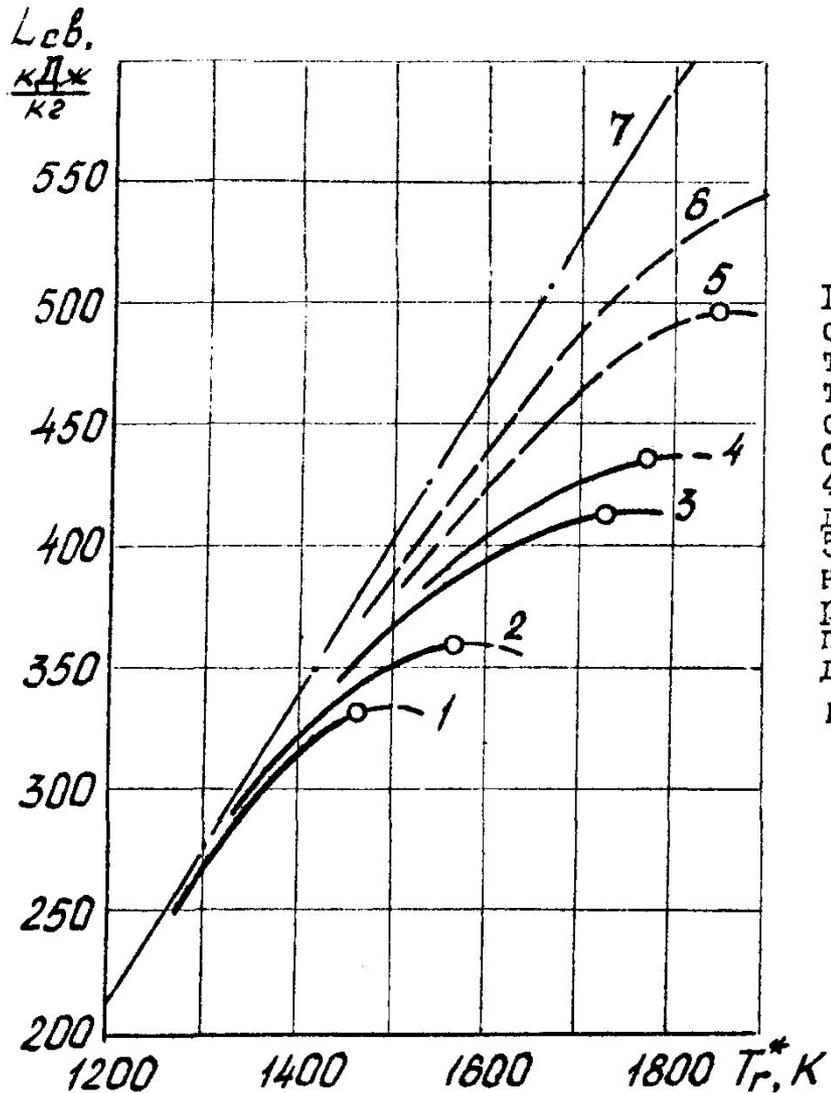
Рост суммарных напряжений

Снижение долговечности, надежности

4. Минимальное воздействие отборов и подводов воздуха на характеристики узлов проточной части.

ВЛИЯНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТУРБИН НА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВО И РЕСУРС

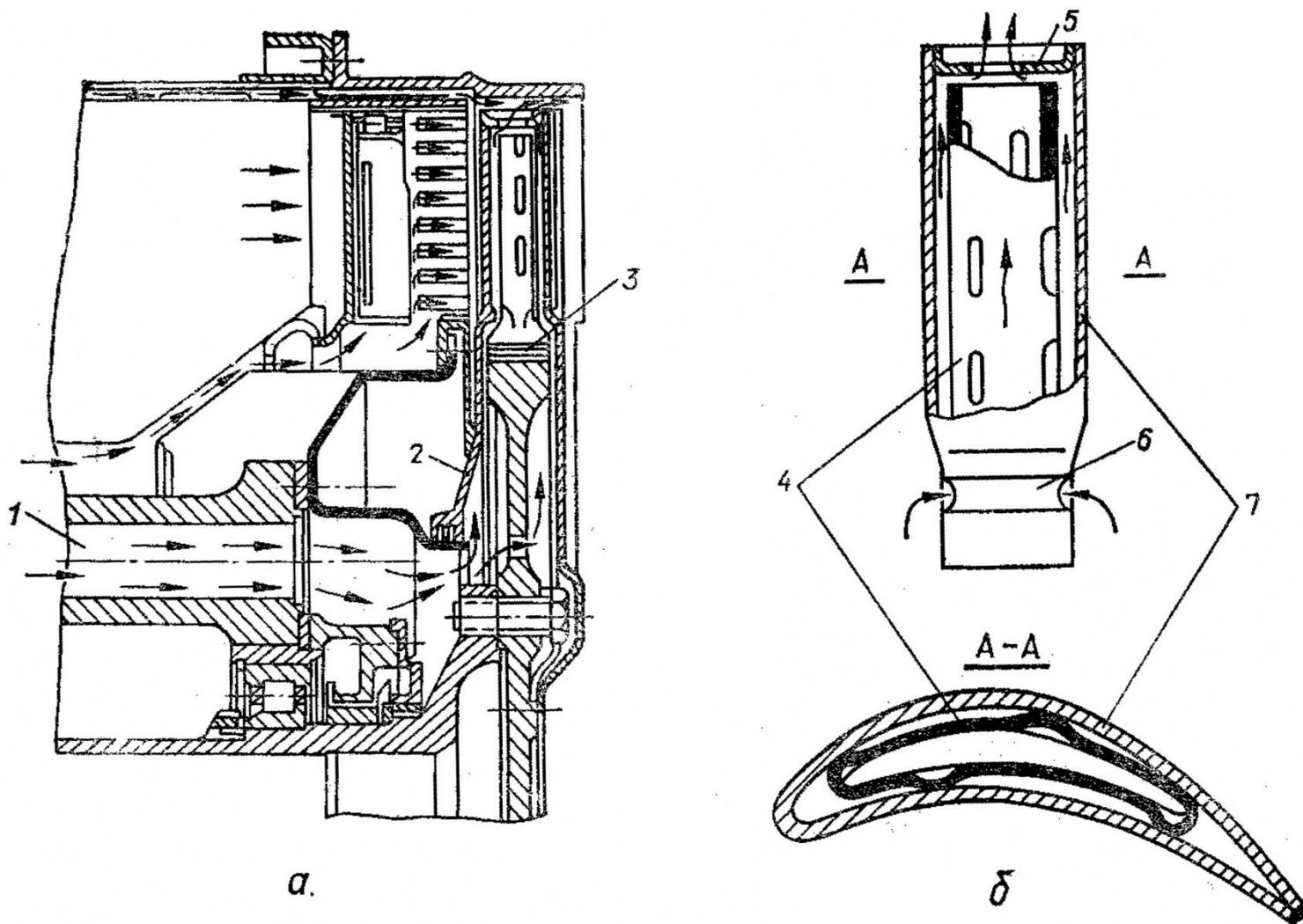
Термодинамический анализ



Графики предельных возможностей различных способов воздушного охлаждения лопаточных венцов турбин ($H = 0$, $M_n = 0$): 1 - внутреннее конвективное охлаждение; 2 - внутреннее конвективное охлаждение с интенсификацией теплосъема; 3 - комбинированное конвективно-пленочное охлаждение; 4 - комбинированное конвективно-пленочное охлаждение с предварительным охлаждением воздуха на 50 ... 70 К; 5 - оболочка из равномерно проницаемых материалов; 6 - оболочка при программированной проницаемости по обводу профиля (1 ... 4 - по данным натурных ГТД; 5 ... 6 - по опытным данным); 7 - идеальный вариант, без затрат энергии на охлаждение

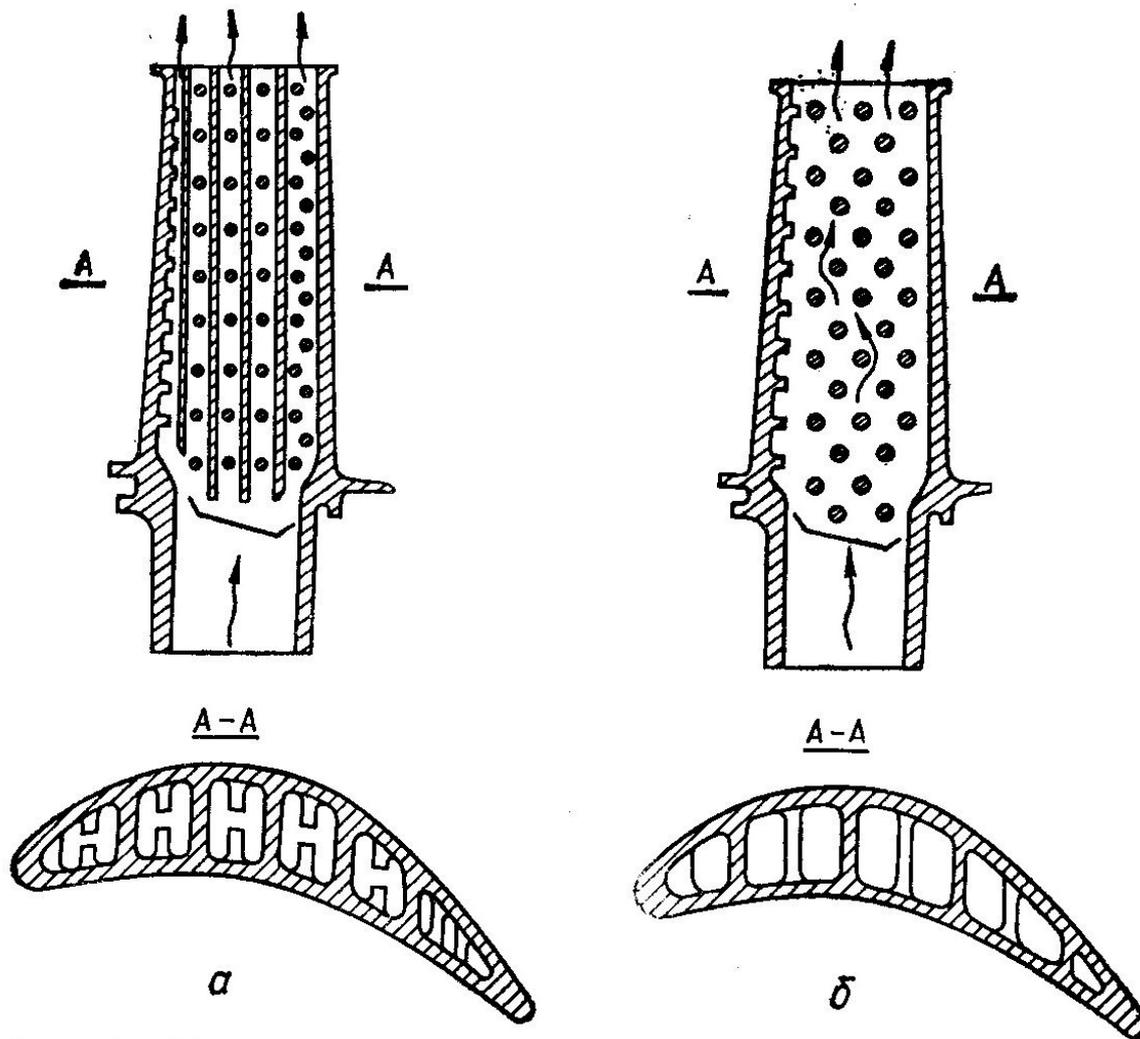
СХЕМЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Схема охлаждения турбины ГТД РД-20 (а)
и ее дефлекторной сварной рабочей лопатки (б)



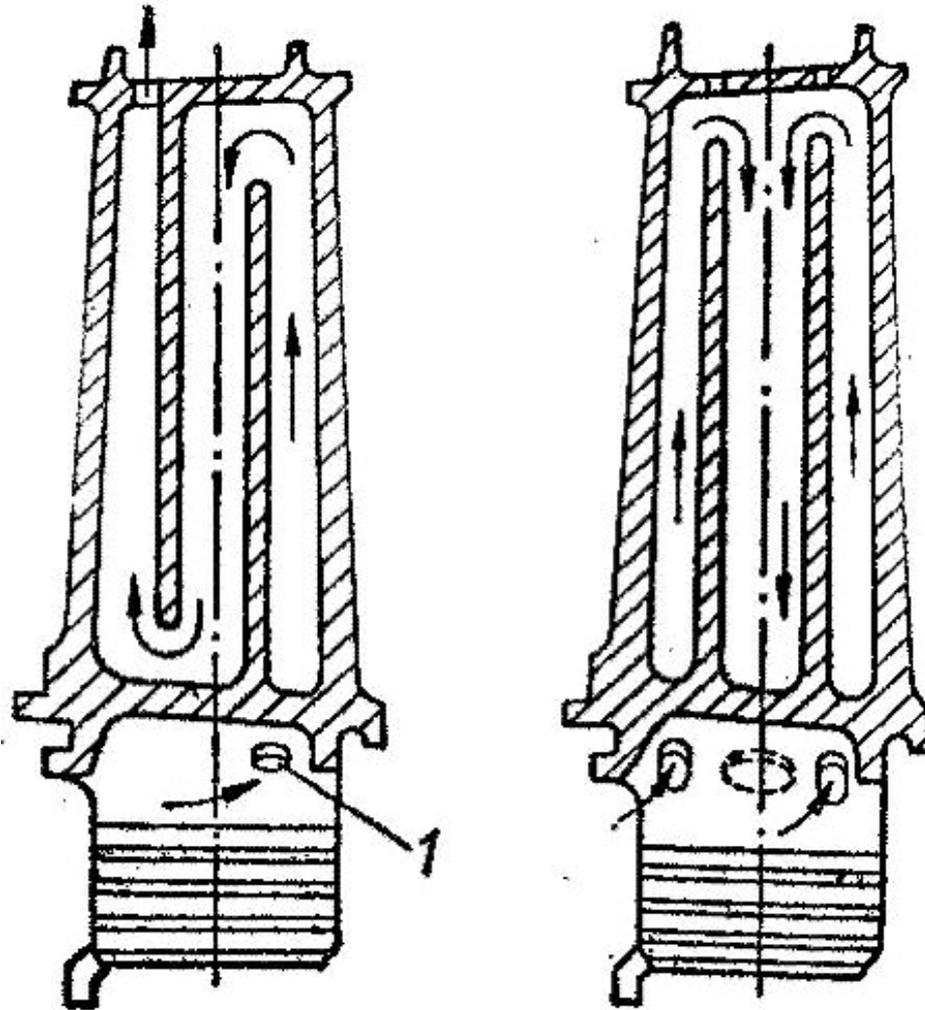
СХЕМЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Схема охлаждения рабочих лопаток с ребрами – турбулизаторами и продольной продувкой воздуха (ГТД фирмы «Аллисон»)



СХЕМЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

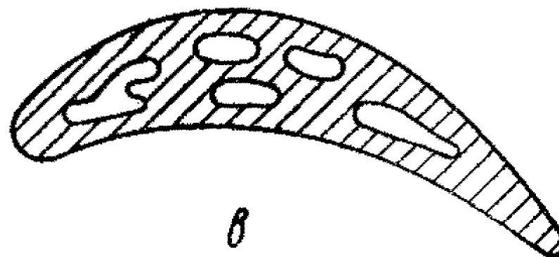
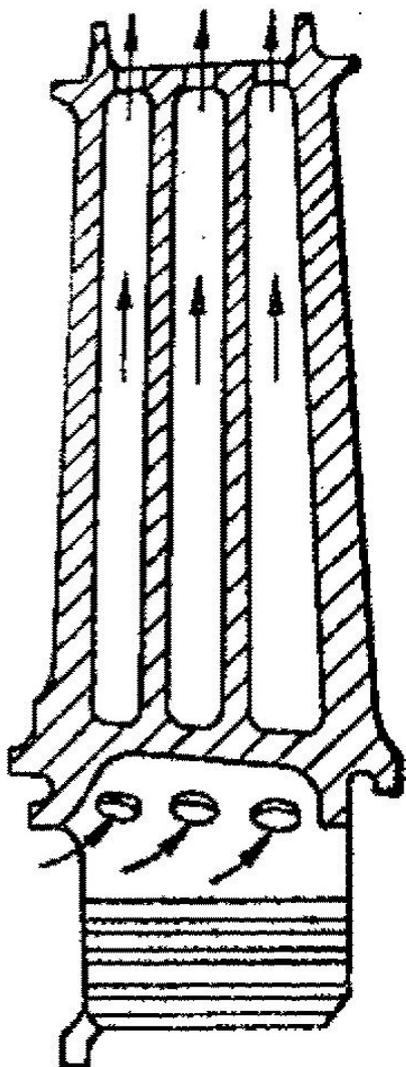
Схема охлаждения рабочих лопаток с петлевым движением воздуха
вторая ступень TF-39 (General Electric)



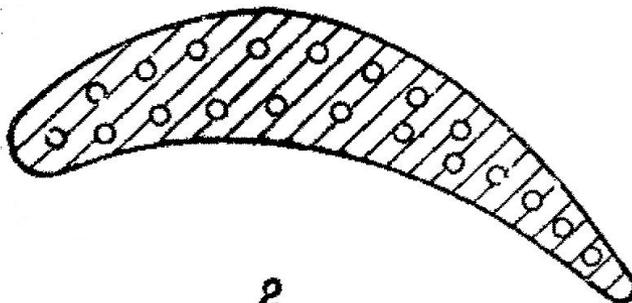
СХЕМЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Схема охлаждения рабочих лопаток с двухрядным расположением каналов

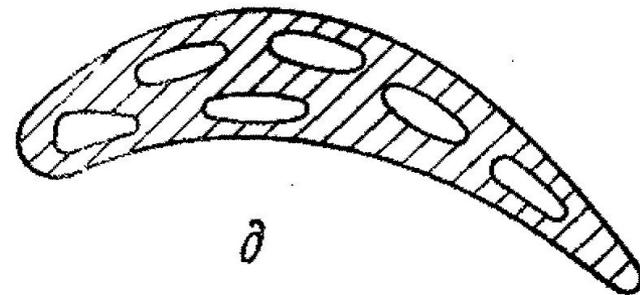
«Olympus», «Spey»



в



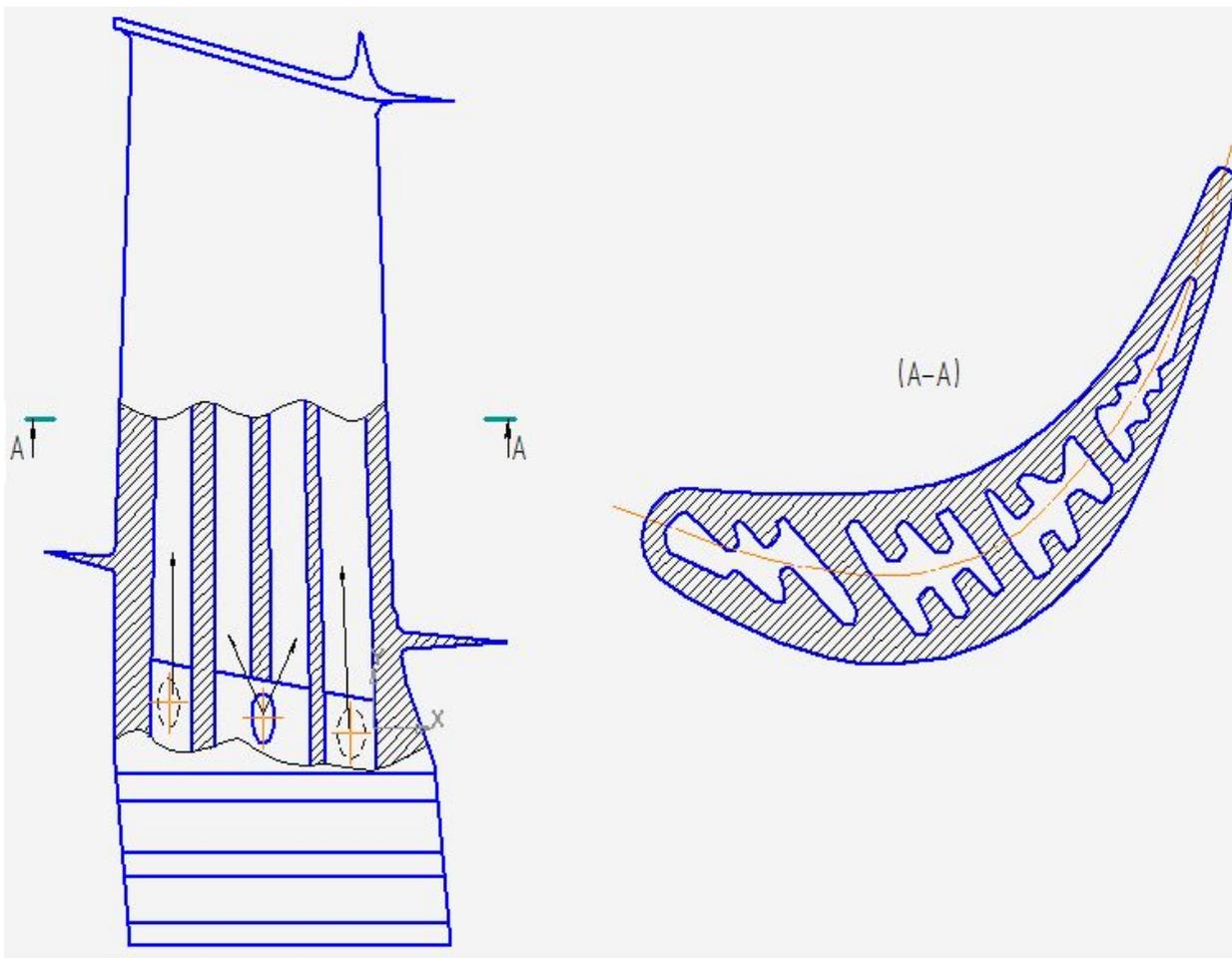
г



д

СХЕМЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

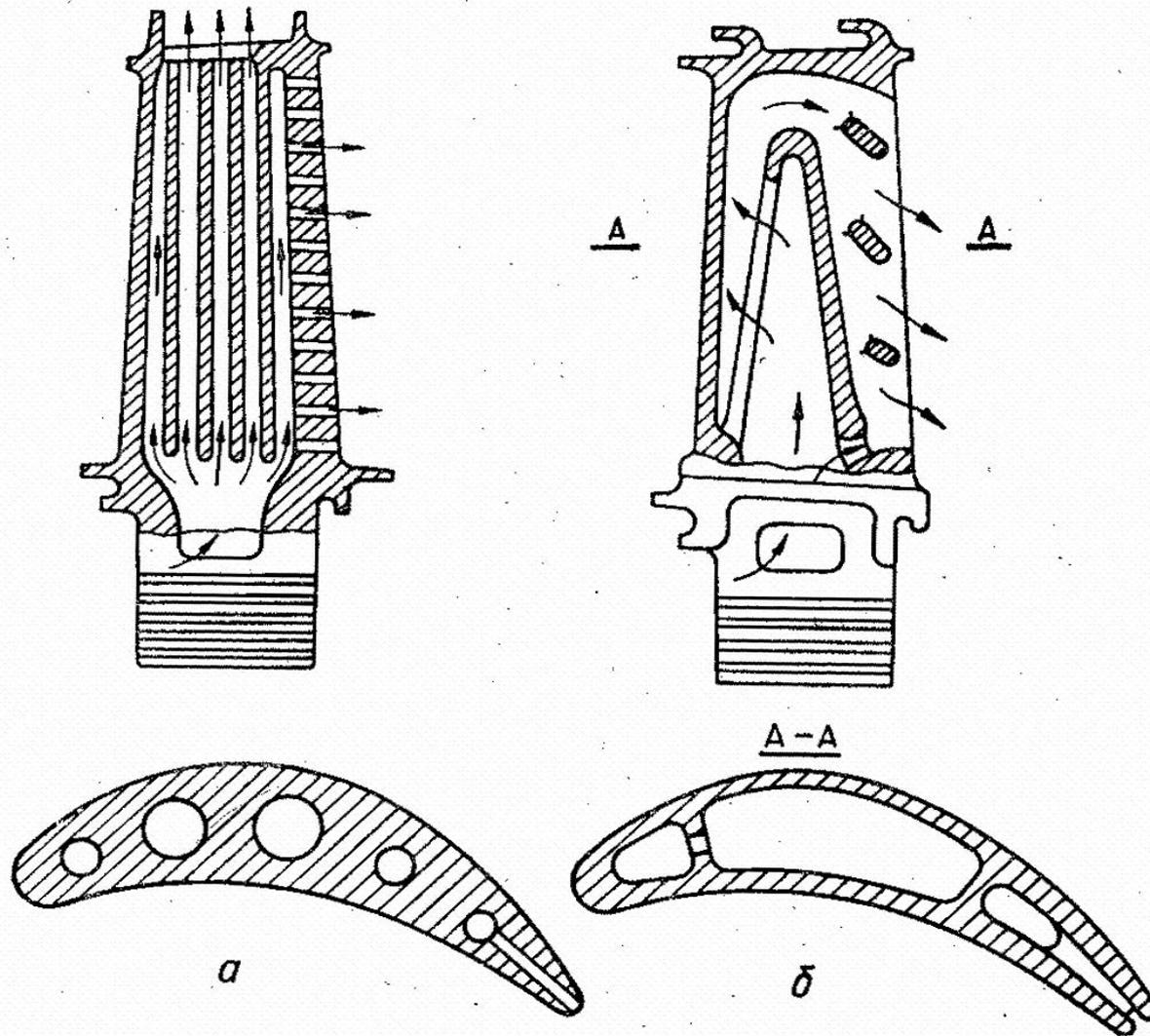
Поперечное сечение рабочей лопатки двигателя Д-36



СХЕМЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Схема охлаждения рабочих лопаток продольно-поперечной продувкой воздуха:

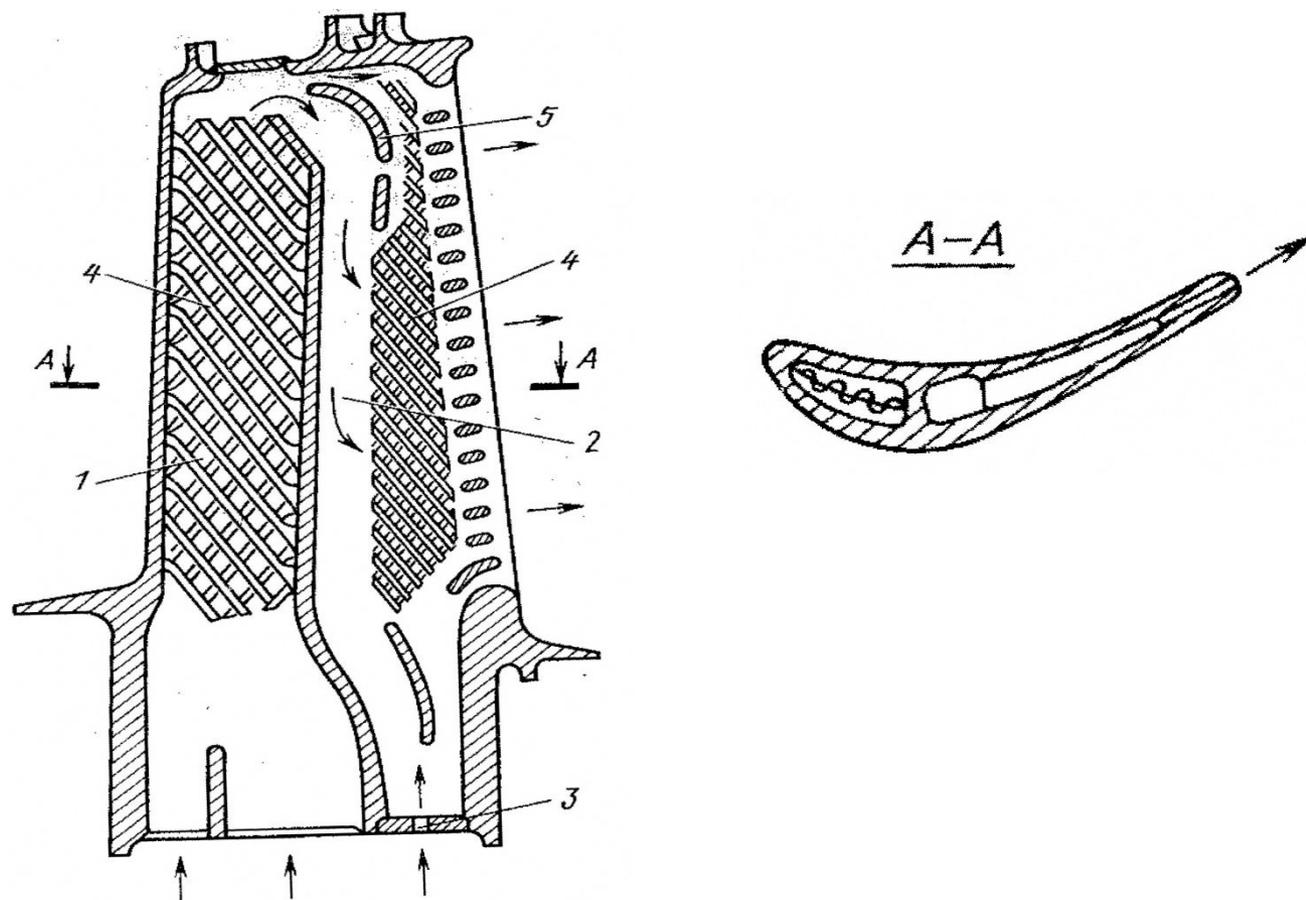
а – ГТД фирмы «Дженерал Электрик»; б – ГТД фирмы «Роллс-Ройс»



СХЕМЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Рабочая лопатка с внутренними перекрещивающимися каналами:

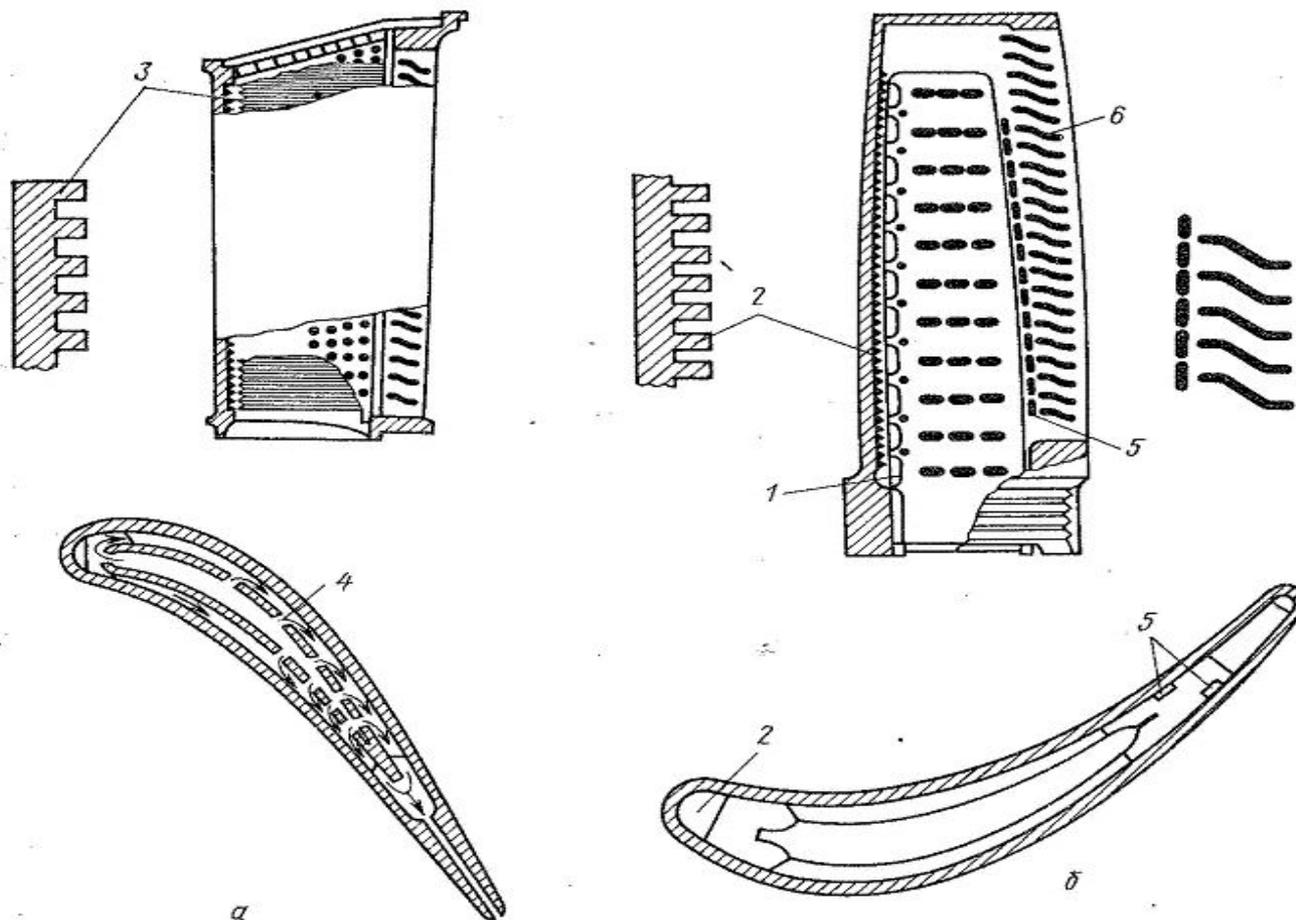
1 – передняя полость; 2 – задняя полость; 3 – жиклер для подпитки задней полости; 4 – ребра, формирующие матрицы с перекрещивающимися каналами; 5 – поворотное ребро



СХЕМЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

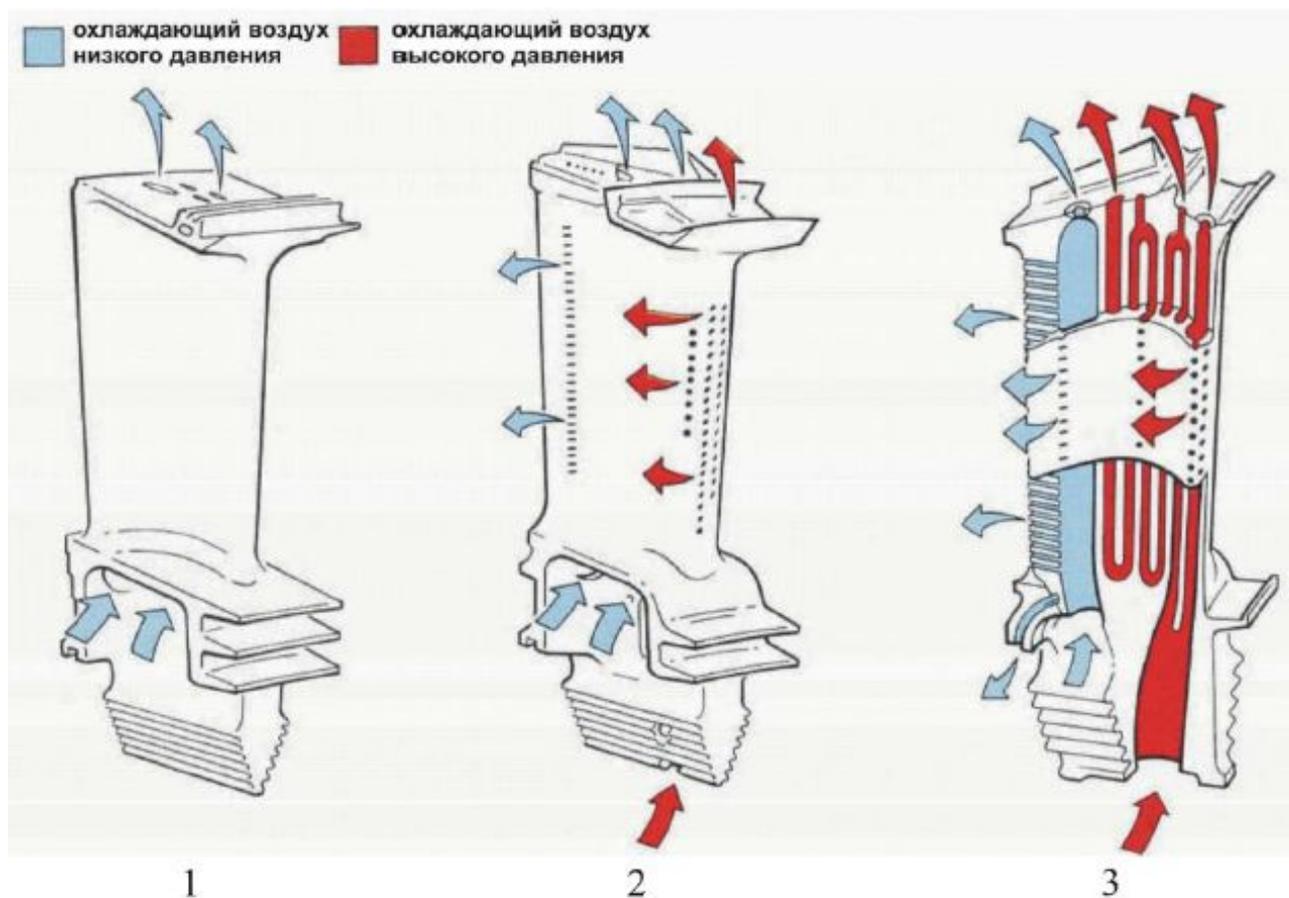
Схема дефлекторных лопаток: а – сопловая; б – рабочая;

*1 – щели подвода воздуха в дефлекторе; 2 и 3 – оребрение входной кромки и
срединного участка профиля; 4 – отверстия в дефлекторе (перфорация);
5 – продольные прерывистые ребра (турбулизаторы); 6 – перемычки*



СХЕМЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Развитие схем охлаждения рабочих лопаток фирмы Rolls-Royce:
конвективная система с радиальным течением (1); система с одноходовым течением и пленочным охлаждением входной и выходной кромок (2) и система с многоходовым течением и интенсивным пленочным охлаждением

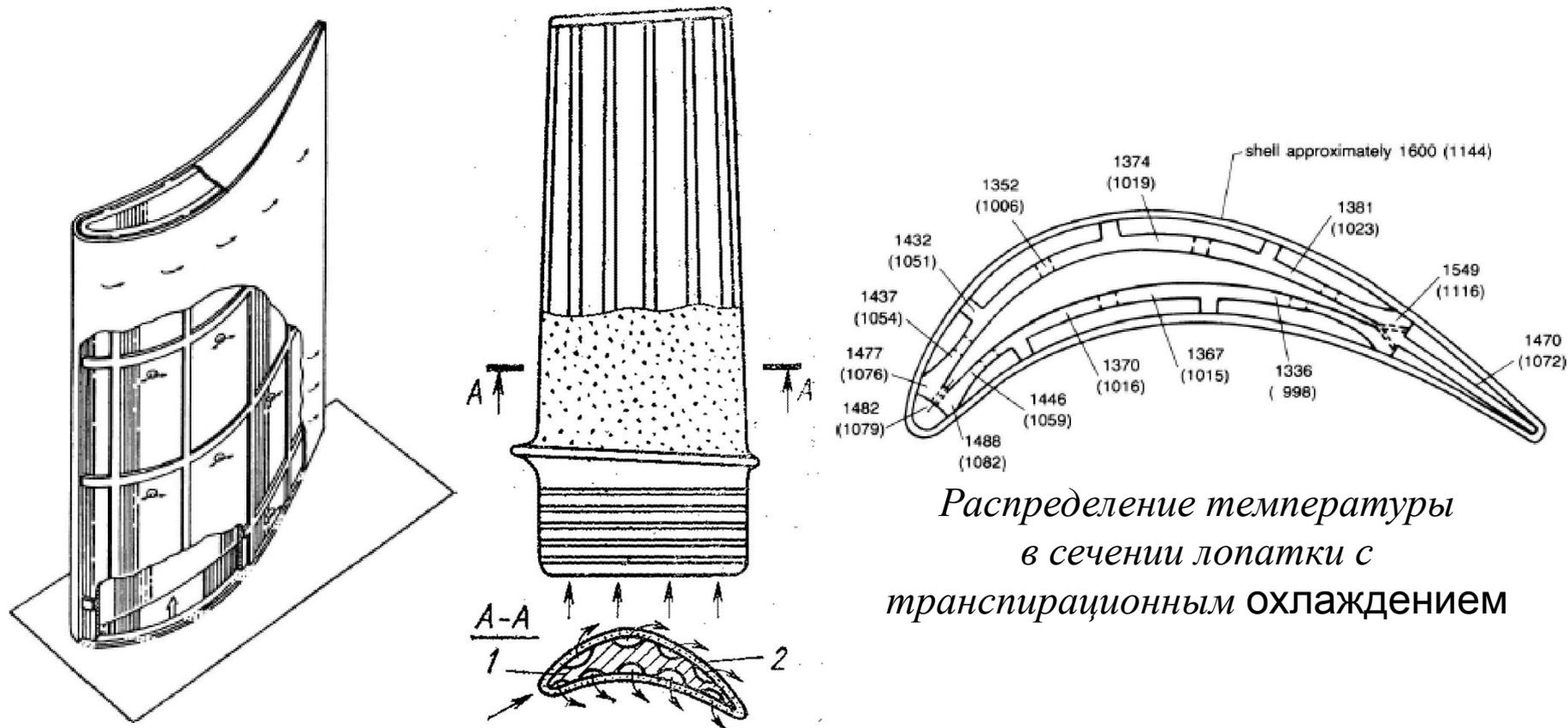


СХЕМЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Схема лопатки с пористым охлаждением:

1 - несущий стержень;

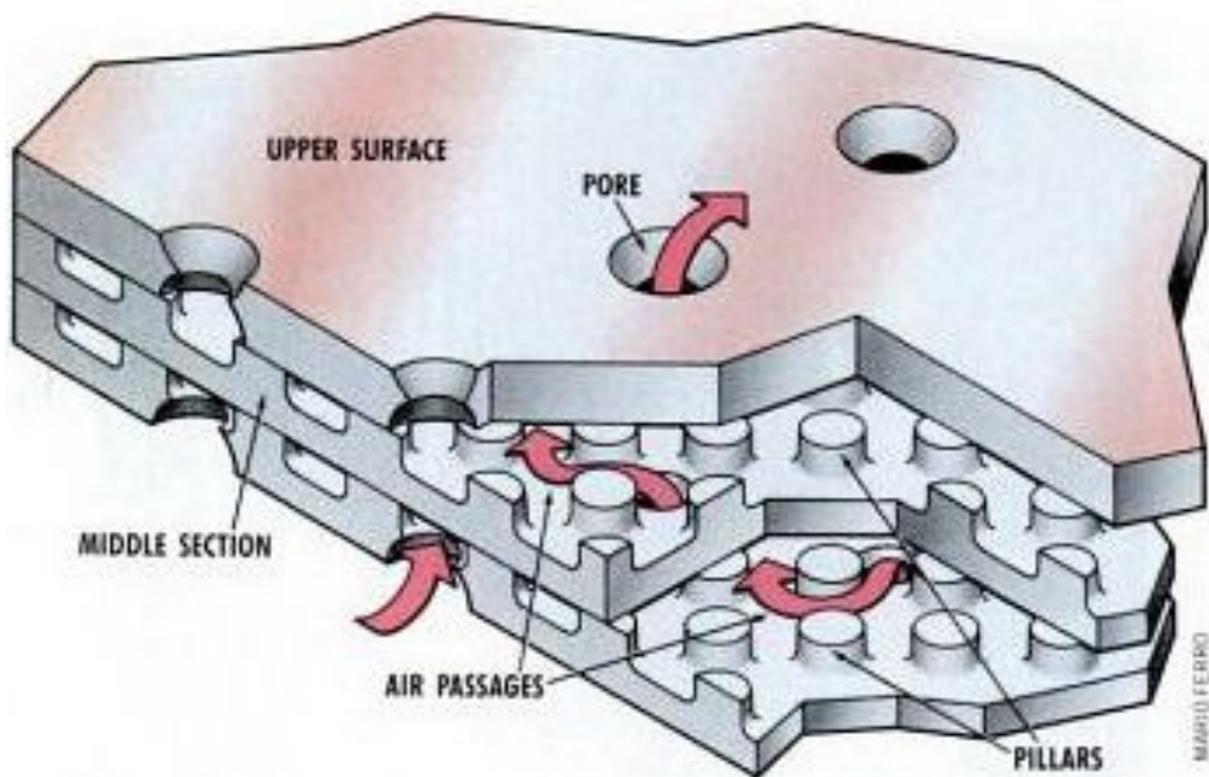
2 - пористая (проницаемая) оболочка



*Распределение температуры
в сечении лопатки с
транспирационным охлаждением*

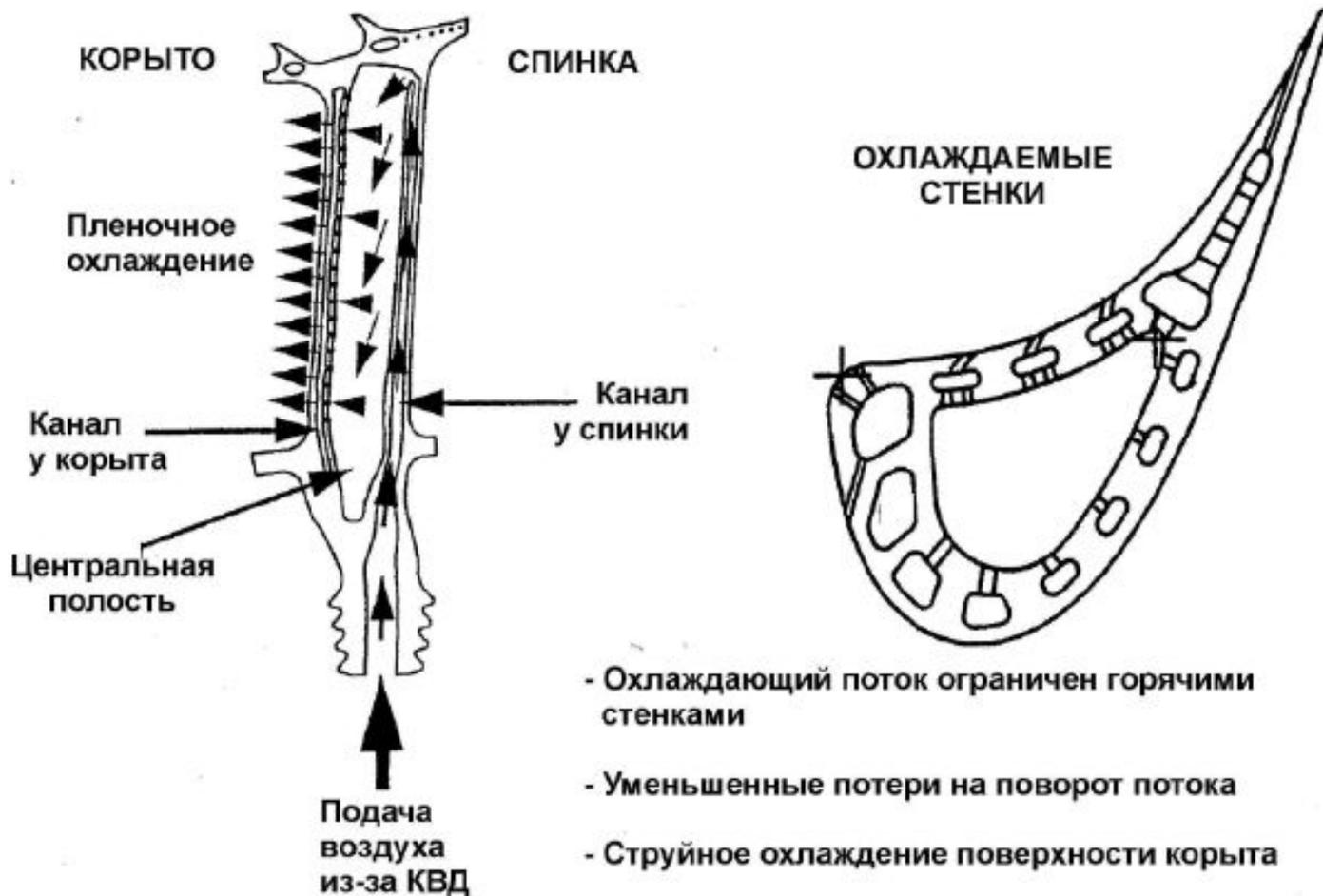
СХЕМЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Конструктивная реализация материала «Ламиллой»



СХЕМЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Перспективная схема охлаждения «лопатка с охлаждаемыми стенками» фирмы Rolls-Royce

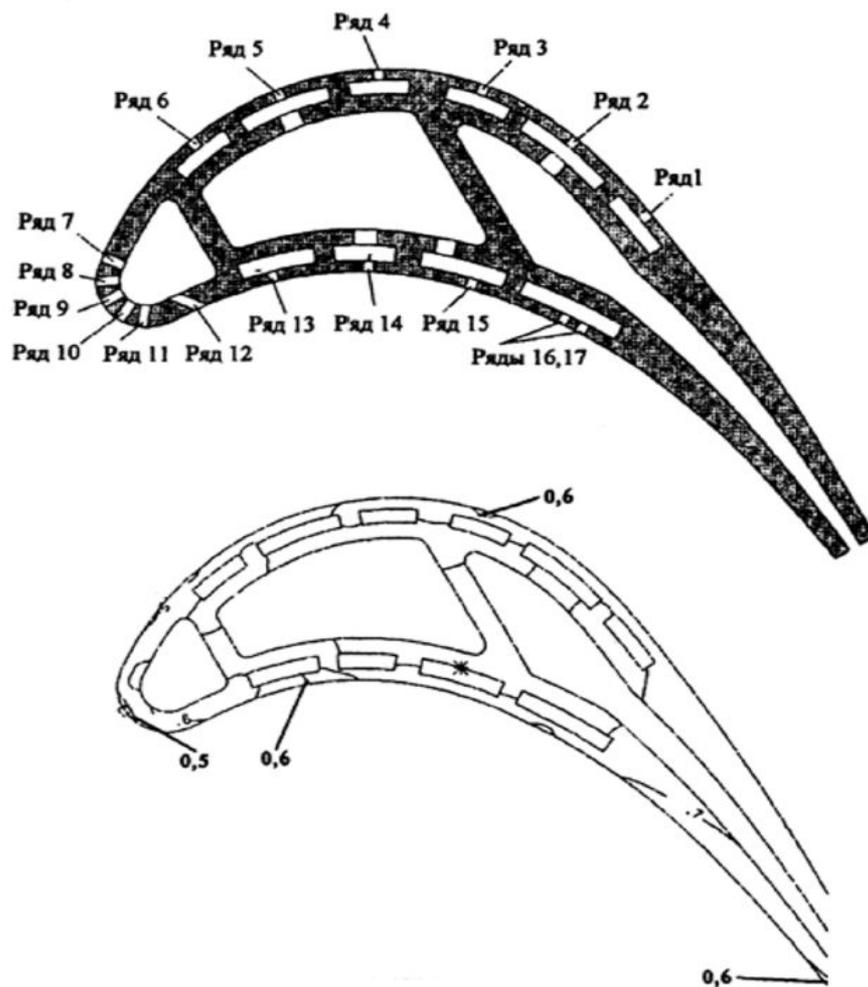


- Охлаждающий поток ограничен горячими стенками
- Уменьшенные потери на поворот потока
- Струйное охлаждение поверхности корыта
- Подача вдоль хорды в выходную кромку

СХЕМЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

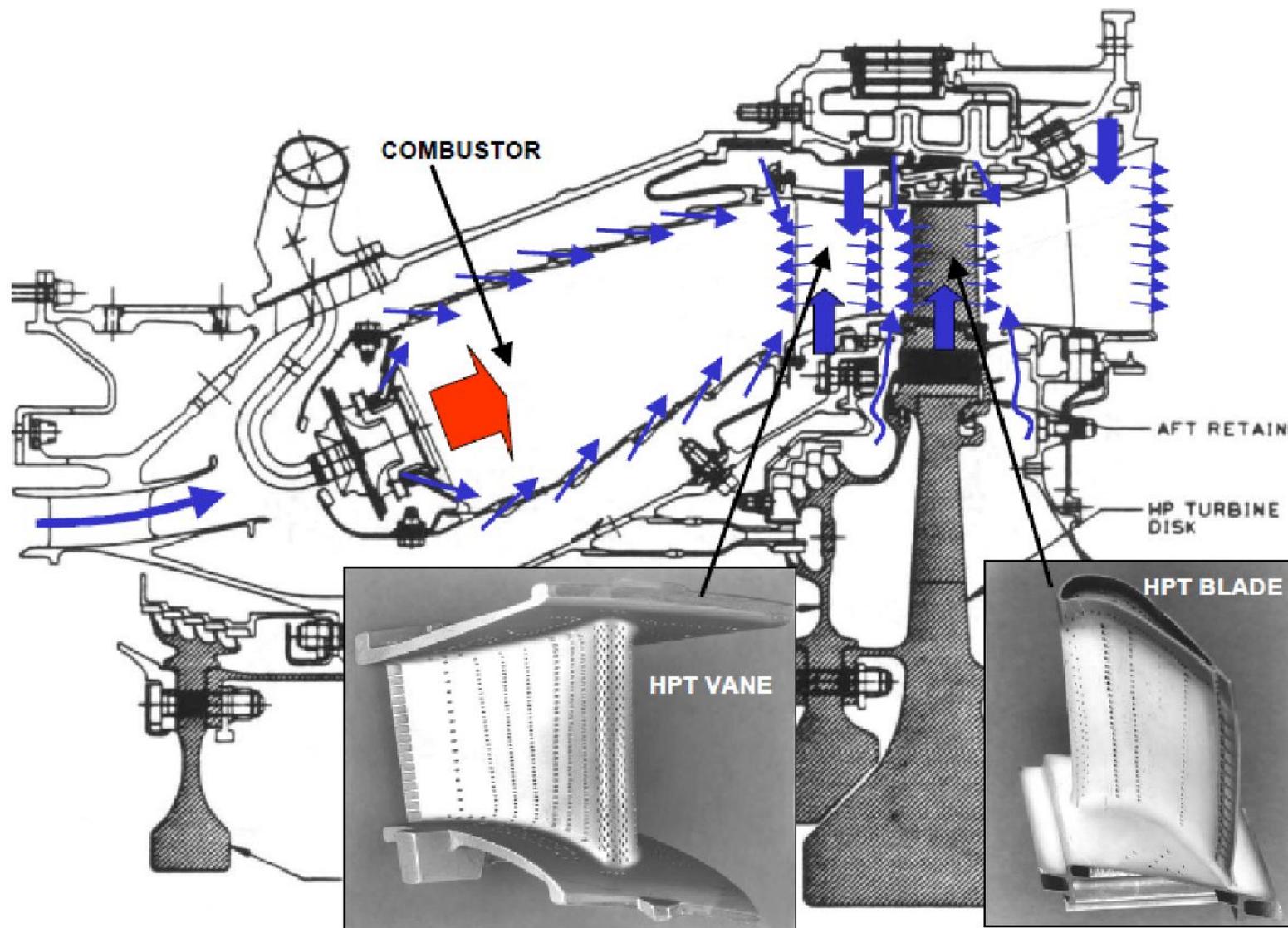
Поперечное сечение лопатки, разработанной в ЦИАМ с использованием так называемой технологии «гибких стержней»

Снизу – распределение относительной эффективности охлаждения по сечению



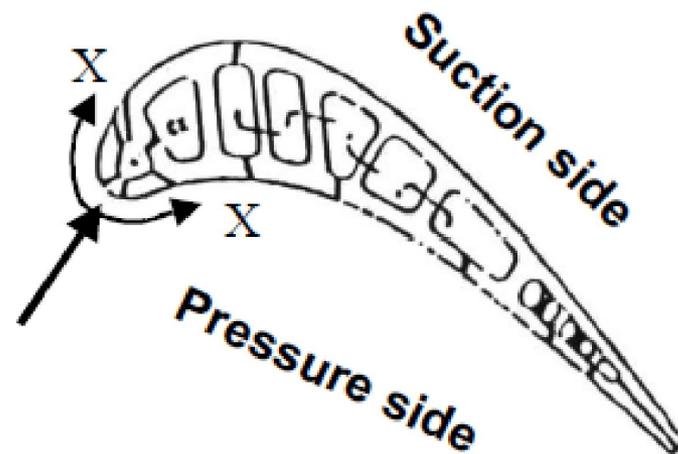
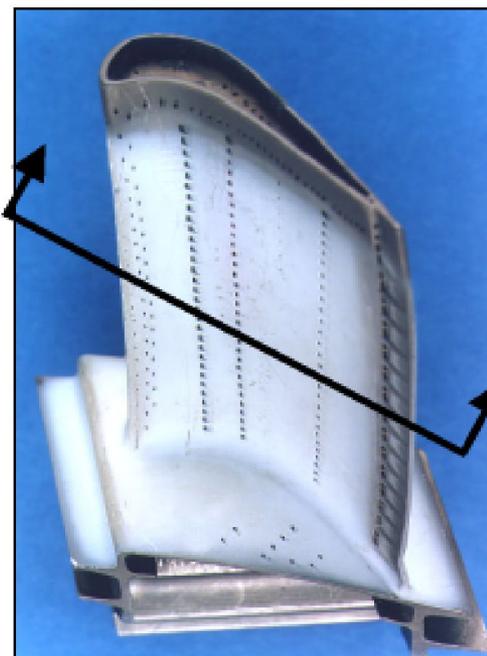
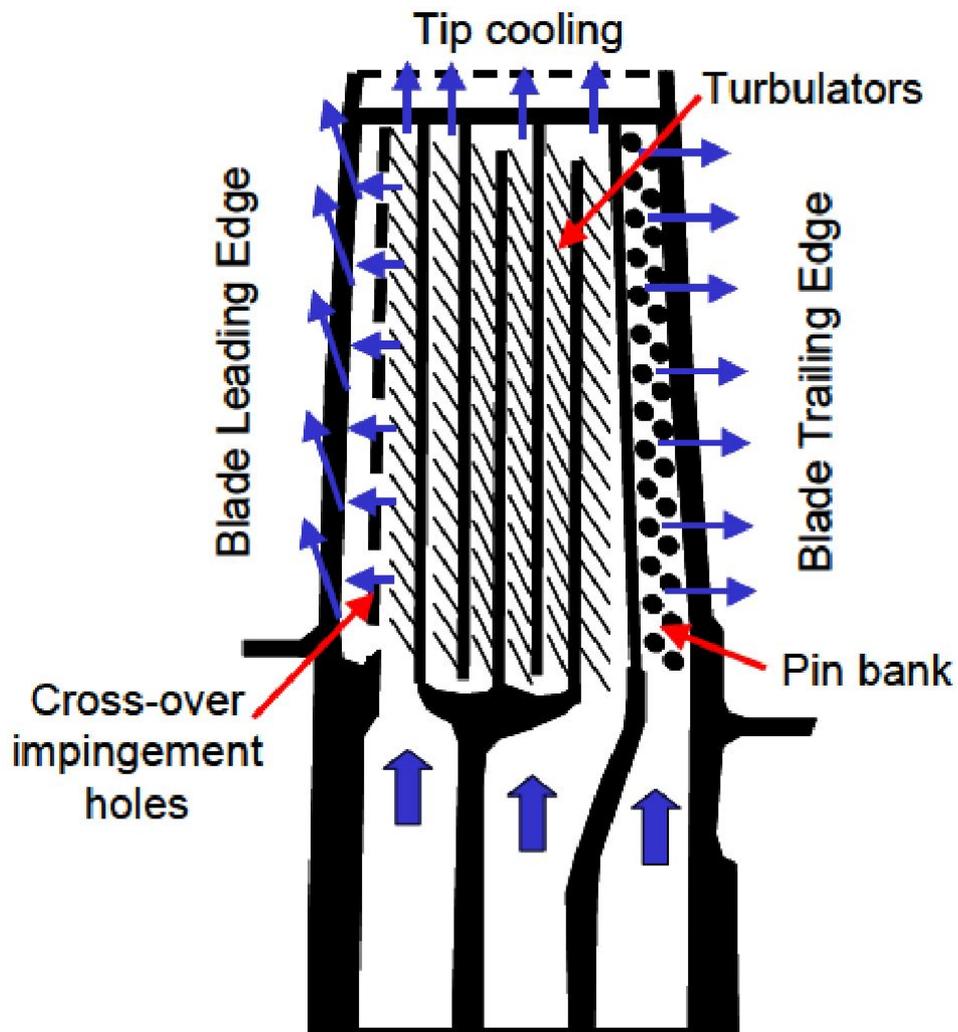
СХЕМЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Типичный вид турбины высокого давления с сопловой и рабочей лопатками



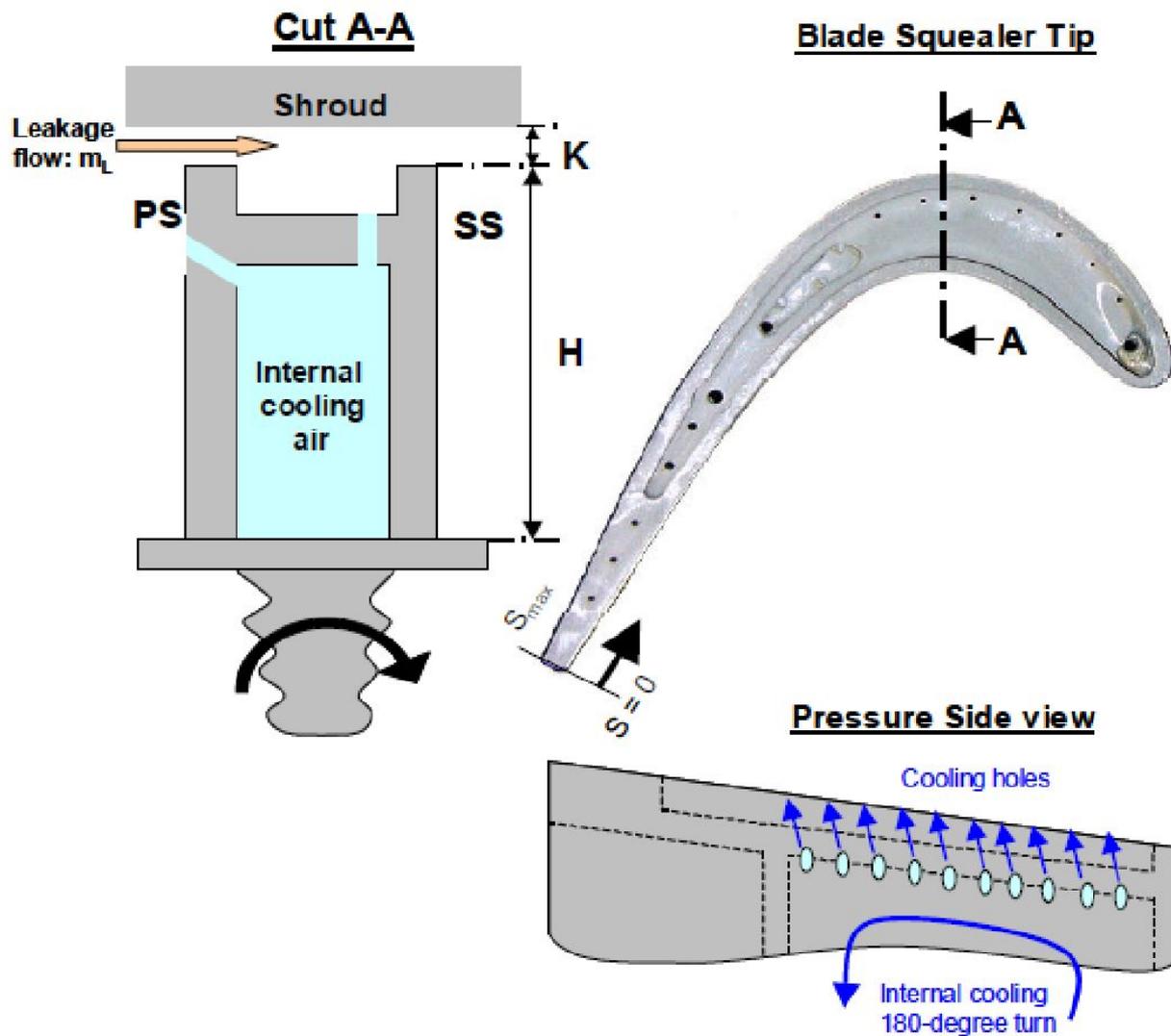
СХЕМЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Пример конструкции рабочей лопатки



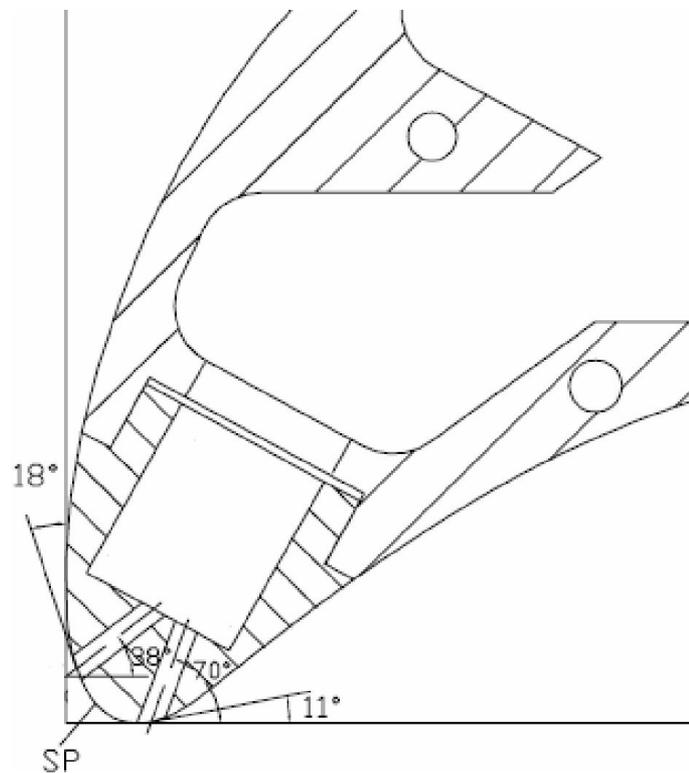
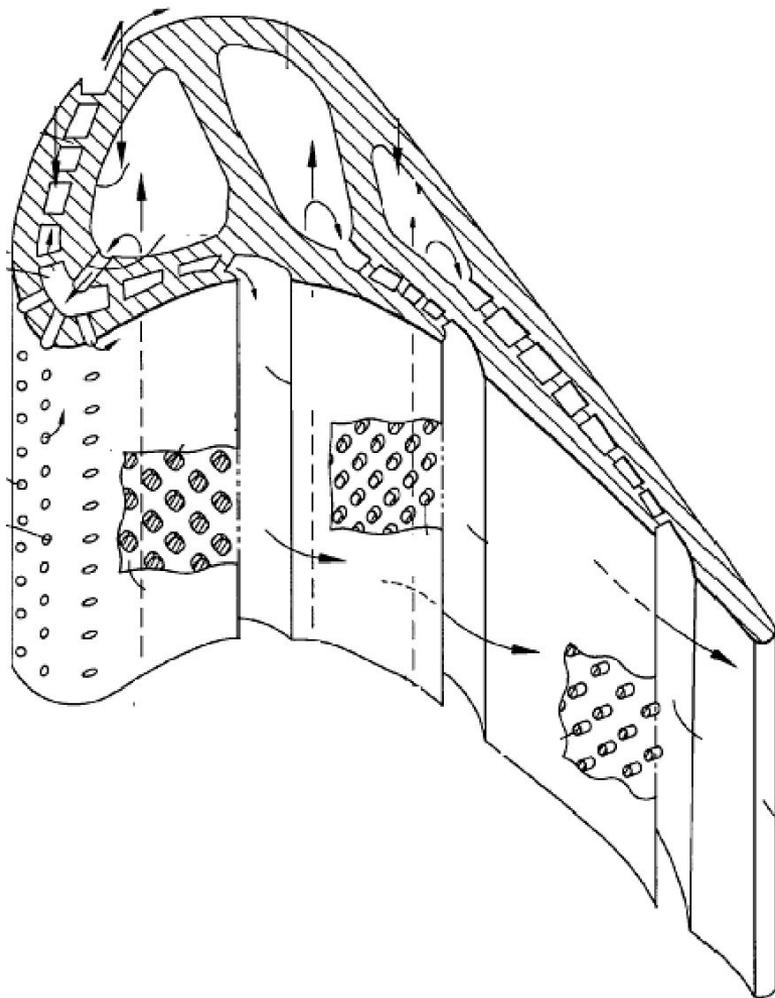
СХЕМЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Охлаждение периферийной части лопатки



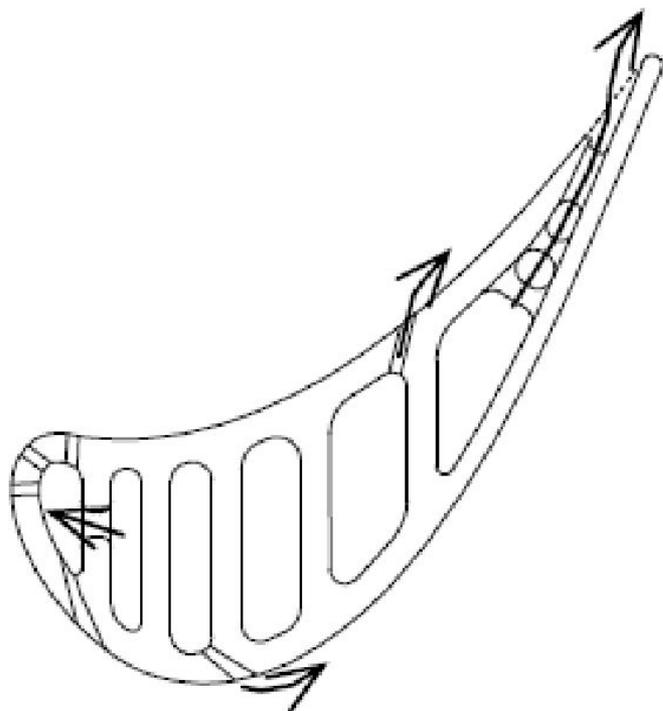
СХЕМЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Передняя кромка рабочей лопатки с пленочным охлаждением (вставка – сменная для исследования различных отверстий)

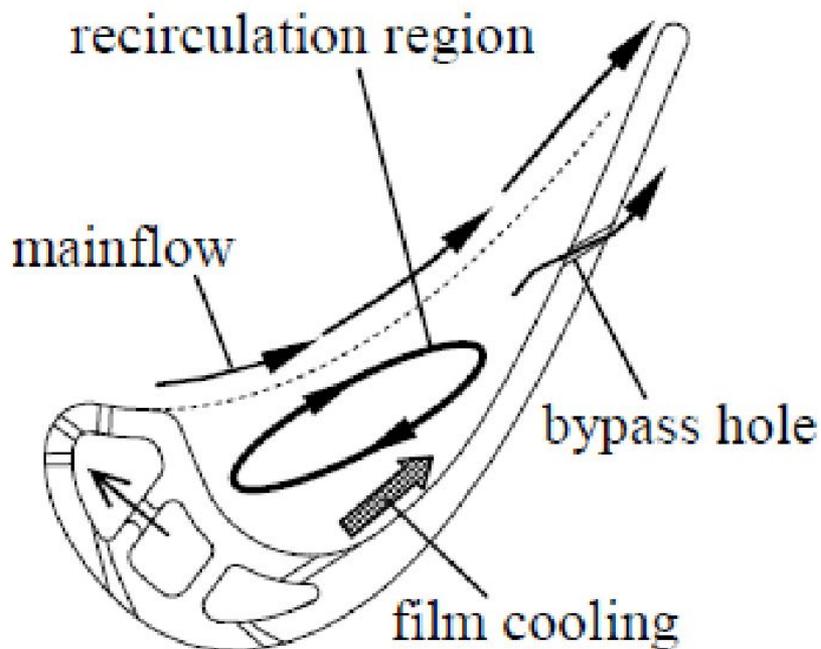


СХЕМЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Облегченная рабочая лопатка с гидравлическим профилем вогнутой части



conventional



lightweight cooled blade

СХЕМЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Рабочая лопатки первой ступени ТВД PW2000

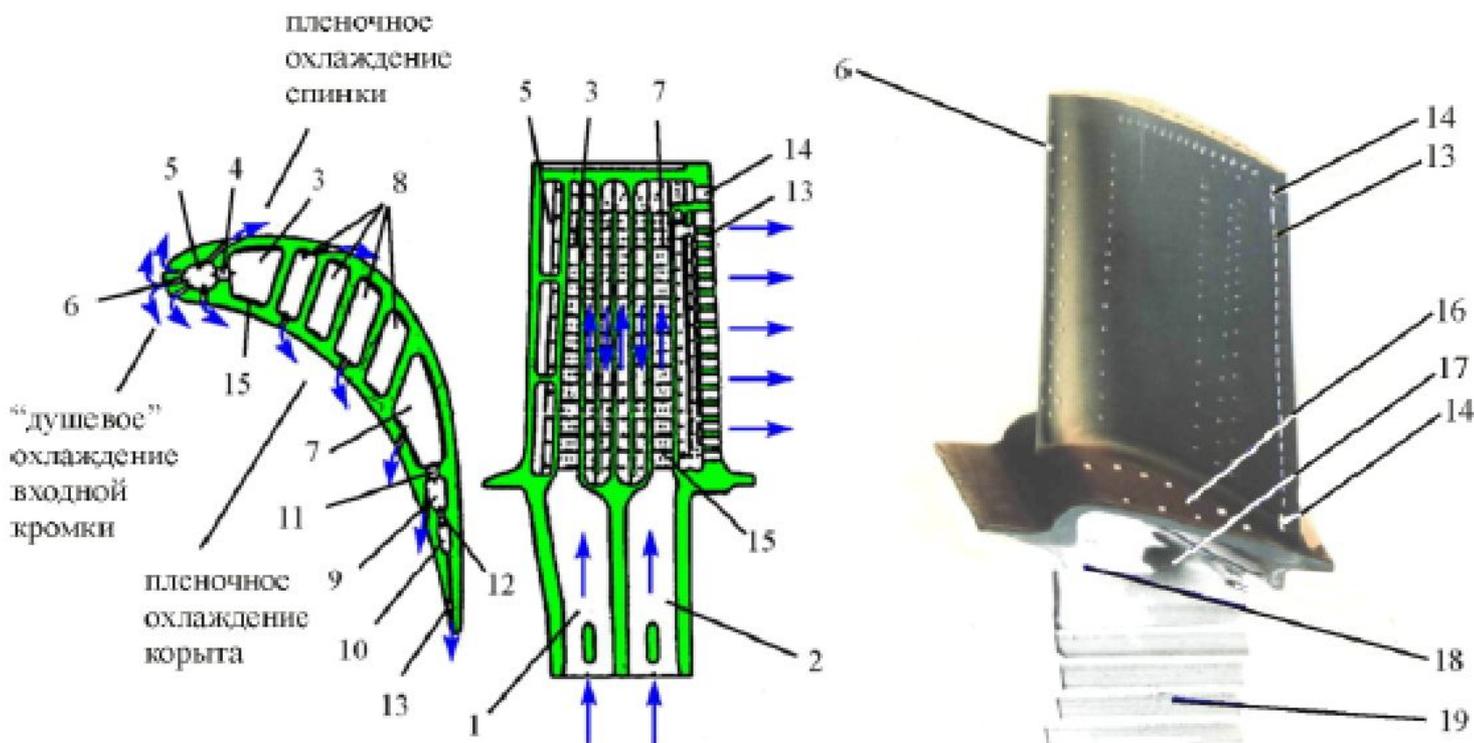


Рисунок 8.4.3_1 – Рабочая лопатка первой ступени ТВД PW2000 (Pratt&Whitney)

1 – передняя полость; 2 – задняя полость; 3 – раздаточный канал передней полости; 4 – отверстия струйного охлаждения; 5 – полость входной кромки; 6 – отверстия «душевого» охлаждения; 7 – раздаточный канал задней полости; 8 – радиальные каналы; 9, 10 – промежуточные полости выходной кромки; 11, 12 – отверстия в вертикальных стенках; 13 – каналы и пазы выходной кромки; 14 – увеличенные пазы; 15 – поперечные ребра; 16 – нижняя полка; 17 – ножка лопатки; 18 – выступы для демпфера; 19 – замок

СХЕМЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Сопловая лопатка 1-й ступени RB211-535E4

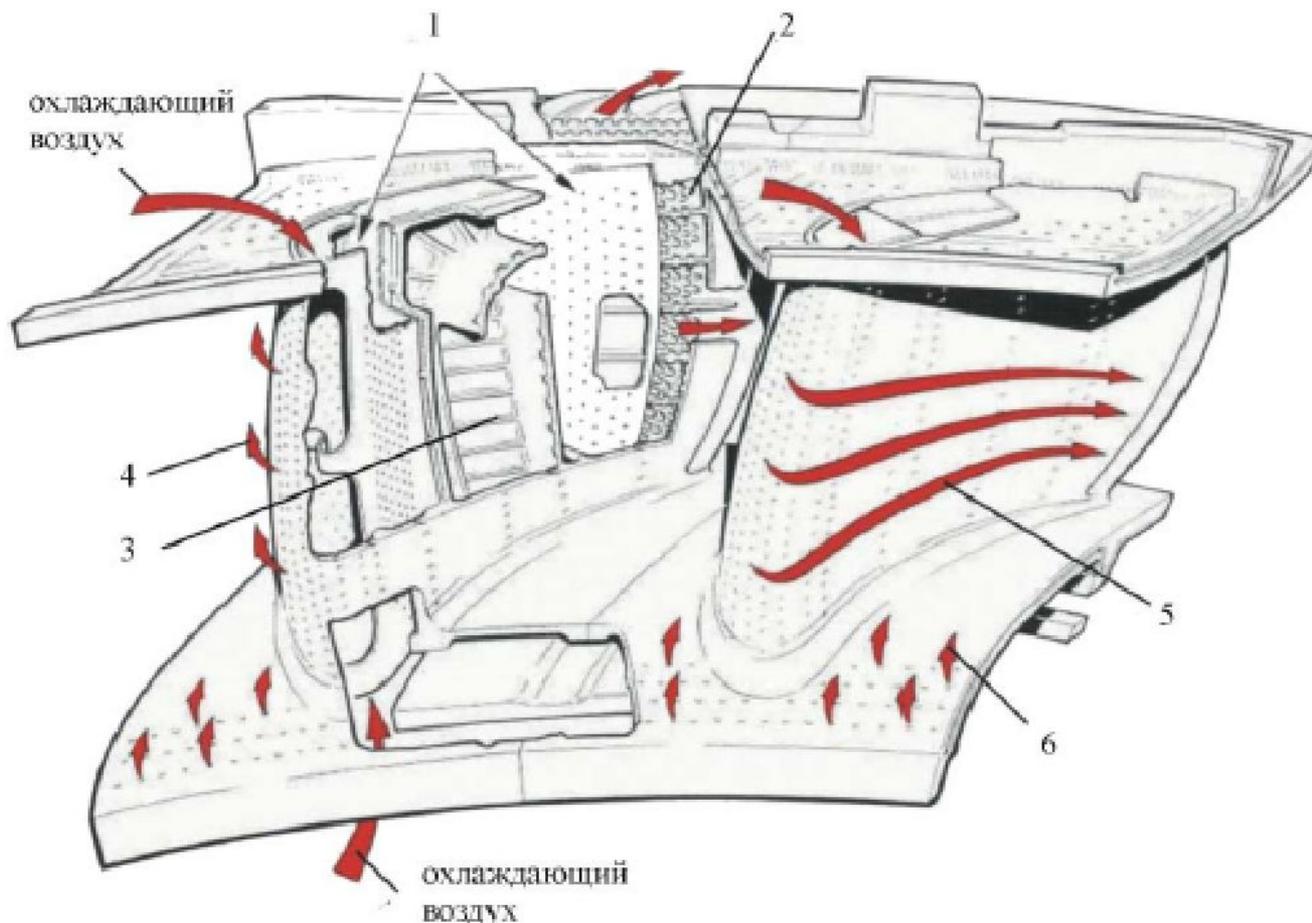


Рисунок 8.3.2_3 – Схема конвективно-пленочного охлаждения сопловой лопатки 1 ступени RB211-535E4 Rolls-Royce [8.3.2]. (Печатается с разрешения Rolls-Royce plc)

1 - дефлекторы; 2 - штырьковая матрица; 3 - пристеночные ребра; 4 - входная кромка; 5 - корыто; 6 - нижняя полка