

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Модуль 5 Способы повышения эффективности ГТУ

Тема 2 Способы увеличения эксплуатационного ресурса камер сгорания



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



ОХЛАЖДЕНИЕ СТЕНКИ КС И ПониЖЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

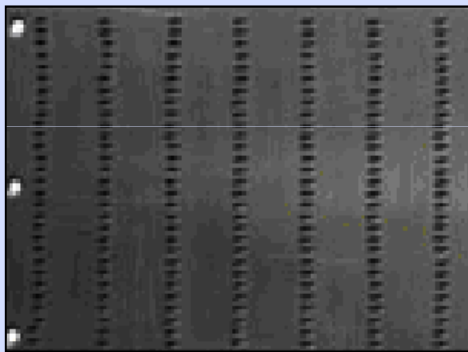
Объем **вторичного воздуха**, не участвующего в процессе сгорания составляет примерно 50...60 % от общего, поступающего из осевого компрессора



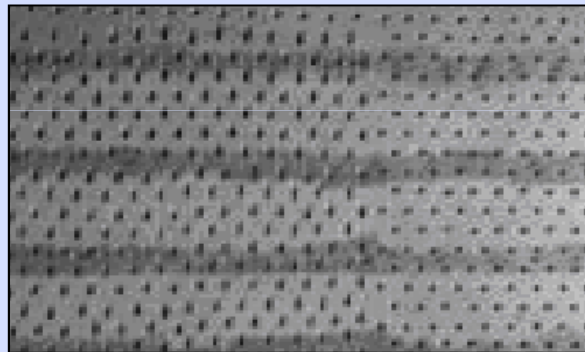
Разделение воздуха на первичный и вторичный потоки

Охлаждающий воздух подаётся через несколько кольцевых щелей различной формы в стенке вдоль внутренней поверхности жаровой трубы

а)



б)



в)



Образцы перфорированных сегментов:

- а) интерметаллидные с наклонными отверстиями;
- б) листовые с наклонными и нормальными отверстиями;
- в) листовые с наклонными щелями

Охлаждение стенки жаровой трубы

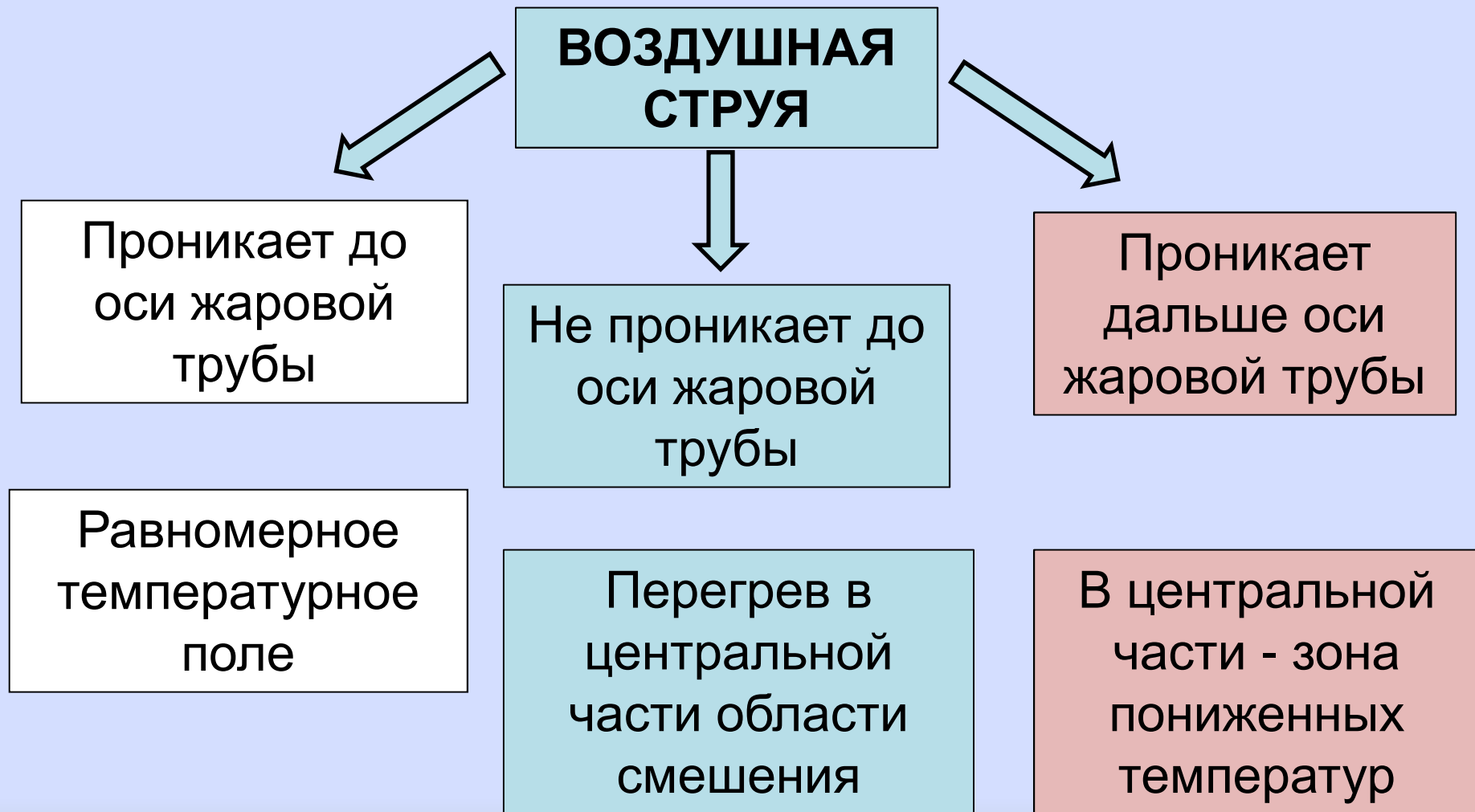


Формирование поля температур начинается в огневой зоне и заканчивается в концевой части жаровой трубы (область смешения).

Эта область обычно имеет конфузурную форму, ее протяженность составляет

$$L \cong (0,3...0,4)L_1$$

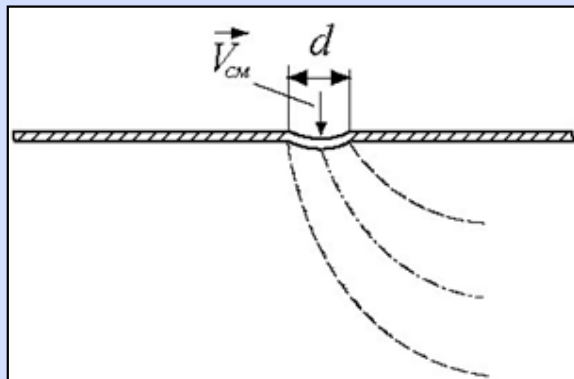
L_1 – длина жаровой трубы



Степень неравномерности температурного поля существенно зависит от дальнобойности струй воздуха

Суммарная эффективная площадь отверстий в стенке жаровой трубы должна обеспечивать распределению расхода воздуха по зонам жаровой трубы

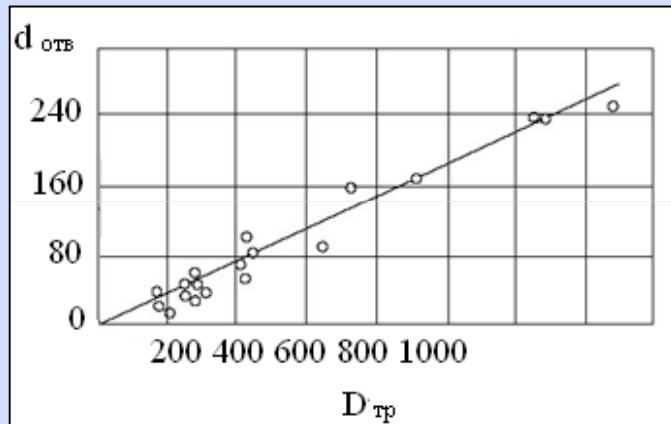
Важно соотношение между количеством отверстий в стенке жаровой трубы и их размерами



Скорость воздуха в отверстиях не должна превышать скорость потока газа более чем в 1,5 раза и обычно лежит в пределах 50...70 м/с.

Проникновение струи воздуха
в поток продуктов сгорания

График зависимости диаметра отверстий смесителя от диаметра жаровой трубы



Эффективность работы смесителя зависит от числа и способа расположения отверстий. Число отверстий (n) определяется из уравнения :

$$G_{см} = \rho v_{см} \frac{\pi d_{отв}^2}{4} n \Rightarrow n = \frac{4 G_{см}}{\rho v_{см} \pi d_{отв}^2}$$

$G_{см}$ - суммарный расход воздуха, проходящего через смесители;

ρ - плотность воздуха;

$v_{см}$ - скорость воздуха в смесителе;

$d_{отв}$ - диаметр отверстия

ПОНИЖЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЕНИЯ И УРОВНЯ ЭМИССИИ В КС

Снижение
температуры в
зоне горения

Уменьшение
объема зоны
высоких температур

- Сжигание обедненных предварительно перемешанных топливовоздушных смесей;
- Сжигание по схеме «богатое горение – быстрое разбавление – бедное горение»;
- Впрыск в камеру сгорания воды или пара;
- Применение генераторов синтез-газа (каталитическое горение).

Ограничения по Низкоэмиссионным КС, работающим по принципу «Сжигание обедненных предварительно перемешанных топливовоздушных смесей»

Тщательно перемешанные ТВС с коэффициентом избытка воздуха в зоне горения $\alpha=1,8...2,0$ имеют очень узкий диапазон устойчивого горения

Обеднение ТВС при $\alpha \geq 2$ приводит к существенному снижению скоростей химических реакций и, как следствие, к бедному срыву горения в камере

Разработка таких КС требует решения таких проблем как пульсационное горение, проскок пламени и самовоспламенение топлива в зоне предварительного смешения

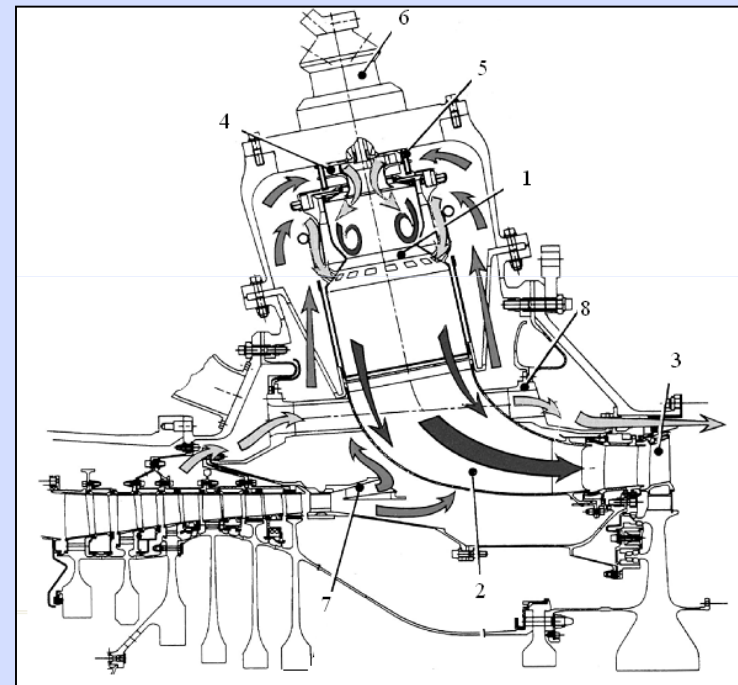
Требуется многоколлекторная подача топлива с перераспределением топлива между коллекторами и перепуск воздуха в зависимости от режима работы газотурбинного двигателя

Технологические решения для повышения устойчивости горения в НКС, работающих по принципу «Сжигание обедненных предварительно перемешанных топливовоздушных смесей»

Использование **«дежурной зоны»** в период запуска газотурбинного двигателя где топливо сгорает в диффузионном пламени (устойчивое пламя)

Последовательная подача топлива и воздуха

Поджег топливно-воздушной смеси в камере сгорания осуществляется с помощью свечи зажигания в виде факельных воспламенителей



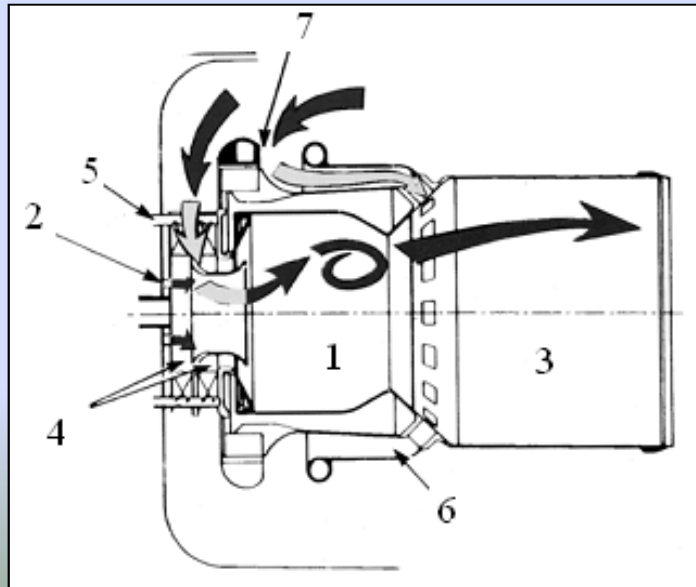
Низкоэмиссионная камера сгорания RB-211-535G, производства Rolls-Royce (Англия):

1 – жаровая труба; 2 – газосборник; 3 – турбина высокого давления;
4 – завихритель; 5 – форсунка; 6 – свеча; 7 – диффузор; 8 – воздушный канал

На запуске и низких режимах работы газотурбинного двигателя топливо подается только в дежурную зону **1** с помощью форсунки **2**, создающей обычное диффузионное пламя.

С повышением режима в дежурную зону начинает подаваться предварительно перемешанная топливно-воздушная смесь.

При дальнейшем увеличении режима работы газотурбинного двигателя вступает в работу «основная зона», куда также поступает перемешанная топливно-воздушная смесь



Жаровая труба камеры сгорания RB-211-535G:

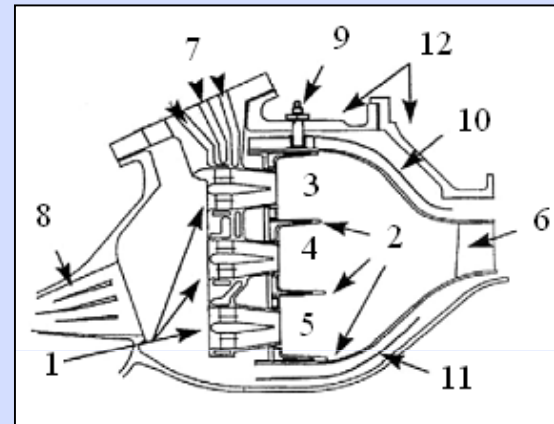
- 1 – дежурная зона;
- 2 – центральная диффузионная форсунка;
- 3 – основная зона;
- 4 – радиальные завихрители;
- 5 – подвод топлива в дежурную зону;
- 6 – смесительный канал основной зоны;
- 7 – подвод топлива в основную зону

Низкоэмиссионные КС

Последовательно расположенные зоны горения

- 1-я (дежурная) зона обеспечивает необходимую огневую поддержку для начала реакции в **основной** зоне;
- процессы во 2-ой зоне не оказывают отрицательного воздействия на горение в 1-ой;
- за счет поддержания постоянной температуры в 1-ой зоне, обеспечивается устойчивое горение в основной зоне, независимо от переходных режимов работы ГТУ и условий на входе в камеру сгорания.

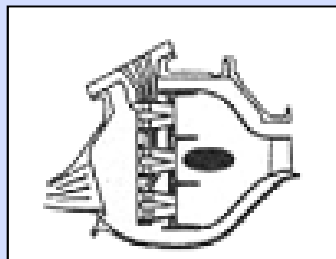
Параллельные зоны горения



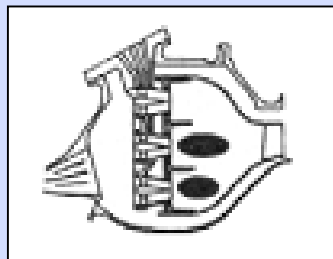
Камера сгорания газотурбинного двигателя LM-6000, производство General Electric, США:

- 1 – горелки; 2 – разделительные перегородки; 3 – внешняя зона горения; 4 – средняя зона горения; 5 – внутренняя зона горения; 6 – первый сопловый аппарат турбины; 7 – подвод топливного газа; 8 – диффузор; 9 – кронштейн; 10 – наружный дефлектор; 11 – внутренний дефлектор; 12 – корпус камеры сгорания

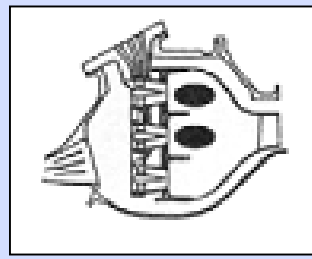
а)



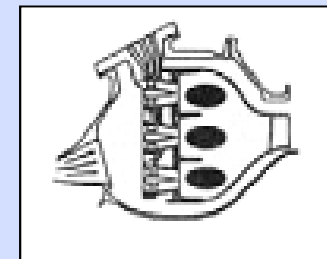
б)



в)



г)



Стадии подключения групп форсунок камеры сгорания двигателя **LM-6000**:

а) запуск; б) режим 5...25% Ne; в) режим 25...50% Ne; г) 50...100% Ne

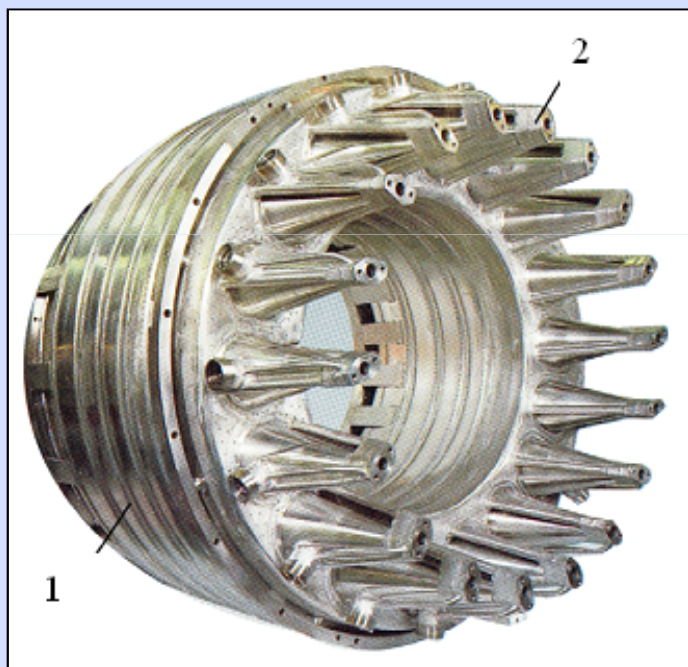
При полной нагрузке топливо поступает во все горелки (рис. г).

По мере снижения нагрузки, поддержание необходимой температуры в зоне горения - за счет уменьшения расхода воздуха, далее прекращается подача топлива в горелки внутреннего кольца (топливо распределяется между горелками наружного и среднего колец) с одновременным закрытием клапанов перепуска воздуха (рис. в).

Далее следует перекрытие 30 горелок наружного кольца и открытие 15 горелок внутреннего кольца (рис. б).

На низких режимах работы топливо подается только в горелки среднего кольца (рис. а)

Кольцевая камера сгорания газотурбинного двигателя GT-10 с 18 горелками, работающая по принципу **сжигания обедненных предварительно перемешанных топливно-воздушных смесей**, фирмы АВВ (Alstom Power, Швеция)



Общий вид камеры сгорания GT-10, фирмы АВВ (Швеция):

1 – жаровая труба; 2 – горелка

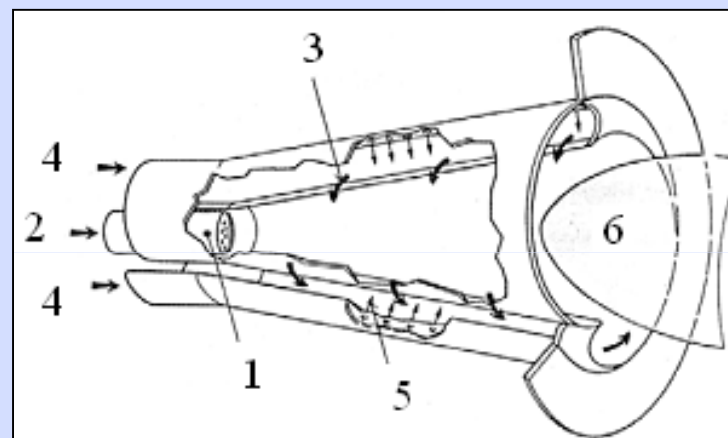


Схема двухконтурной горелки КС GT-10:

1 – диффузионная форсунка;

2 – топливо;

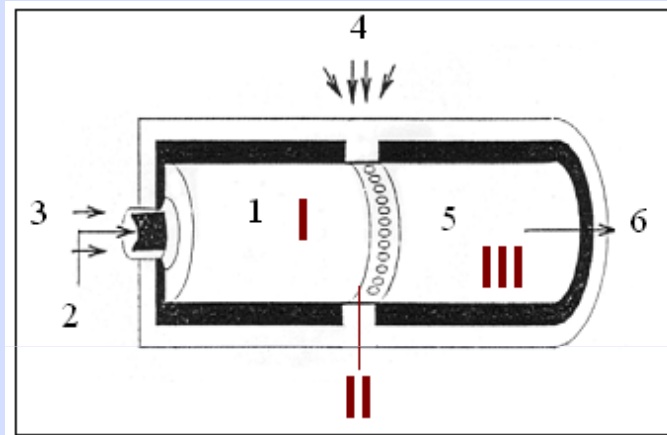
3 – воздух;

4 – природный газ;

5 – отверстия;

6 – вихревая зона

Низкоэмиссионные камеры сгорания, работающие по принципу «Богатое горение – быстрое разбавление – бедное горение»



Зона жаровой трубы:

1 (I) – зона богатого горения;
2 – подача топлива; **3** – подвод воздуха в обогащенную зону;
4 – подвод воздуха в зону смешения; **5 (III)** – зона бедного горения; **6** – продукты сгорания; **II** – зона резкого разбавления

В зоне **I** формируется горение обогащенной ТВС с $\alpha_1 = 0,6...0,8$.

В зоне **II** все ПС, поступающие из зоны 1, смешиваются с новыми холодными порциями воздуха. Создается обедненная смесь, понижается температура ТВС, $\alpha_2 = 2,0$.

В зоне **III** происходит горение обедненной смеси, состоящей из продуктов неполного горения и воздуха.

Простота системы регулирования подачи топлива

ВПРЫСК В КС ВОДЫ ИЛИ ПАРА

Расход воды или пара не менее 100...150% от расхода топлива

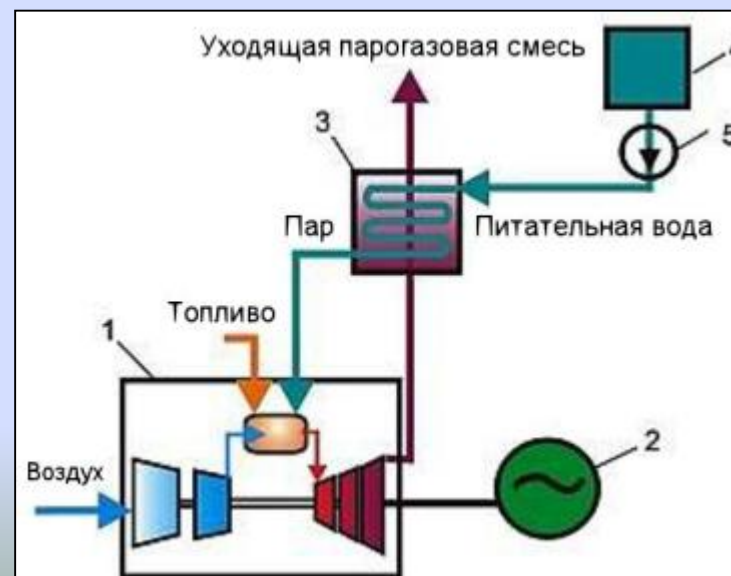
Термические перепады

Пульсация давления

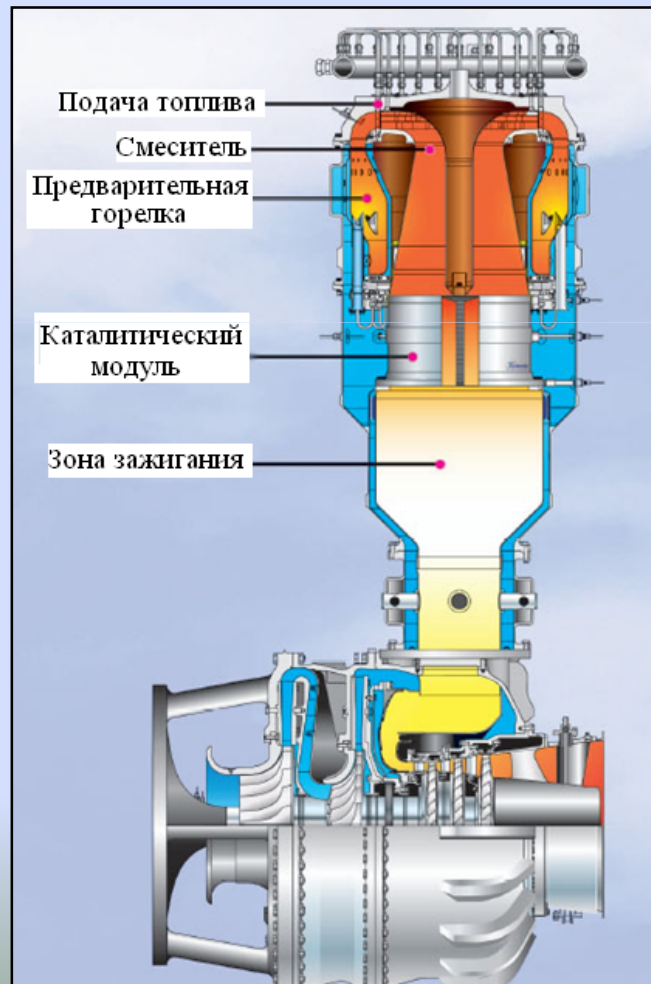
Снижение ресурса КС

Усложнение конструкции КС

Требуется предварительная очистка воды или пара



ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ СИНТЕЗ-ГАЗА (КАТАЛИТИЧЕСКОЕ ГОРЕНИЕ)



Мини ГТУ GPB-15X фирмы Kawasaki с каталитической камерой сгорания

Недостаток таких КС – ограниченный ресурс катализатора



Общий вид каталитического пакета, разработанного Институтом катализа СО РАН, Новосибирской обл., г. Бердск (катализаторы на меднохромовой основе и на основе марганца)

УВЕЛИЧЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ МАТЕРАЛА КС

Термобарьерное покрытие КС

Термостойкая подложка

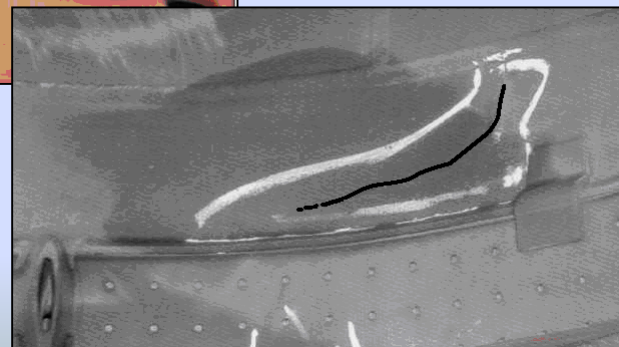
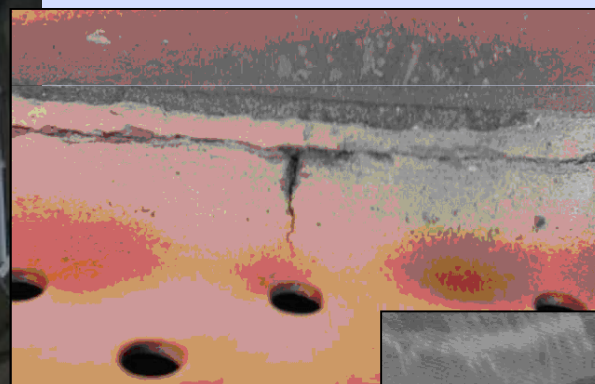
На основе хрома, никеля и алюминия

Металлокерамика

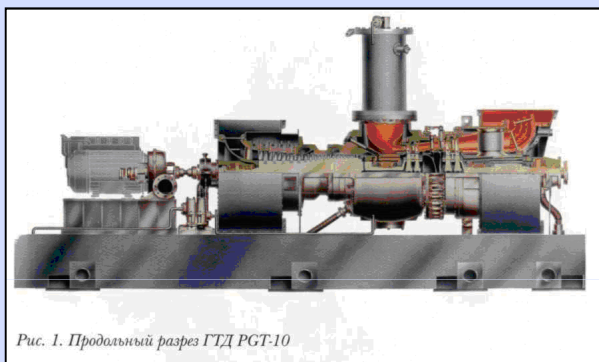
| Теплофизические свойства алюмоборонитридной керамики | |
|---|--------------------|
| Наименование величины | Численное значение |
| Максимальная температура эксплуатации t_{max} , °С | 1600 |
| Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10$, К | 9,0 |
| Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К) | 14,0...16,0 |
| Удельная теплоемкость C , кДж/(кг·К) | 1,1 |
| Предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$, МПа | 110 |
| Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$, МПа | 400...450 |
| Модуль продольной упругости $E \cdot 10$, МПа | 0,08...0,2 |

На основе оксида циркония

Осложнения, связанные с эксплуатацией камер сгорания ГТУ

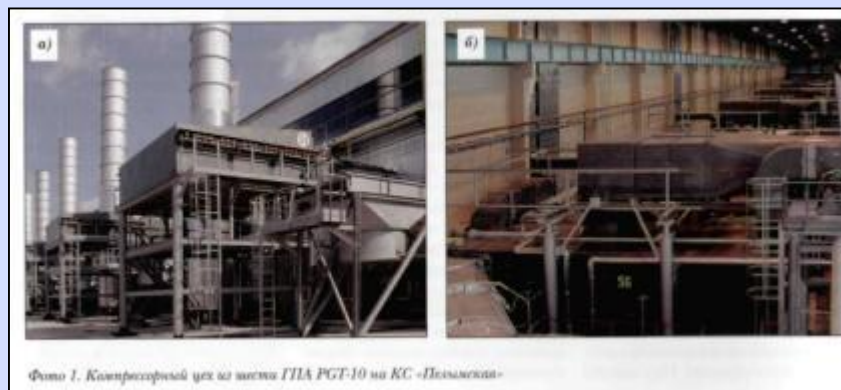


**Осложнения на опыте эксплуатации ГПА -10
ООО «Тюменьтрансгаз» компрессорной станции «Пелымская» за
период 2000-2007 гг.**



Конструктивные особенности,
определяющие условия
эксплуатации камер сгорания

дефекты жаровых труб;
дефекты переходных патрубков;
сопловый аппарат турбины

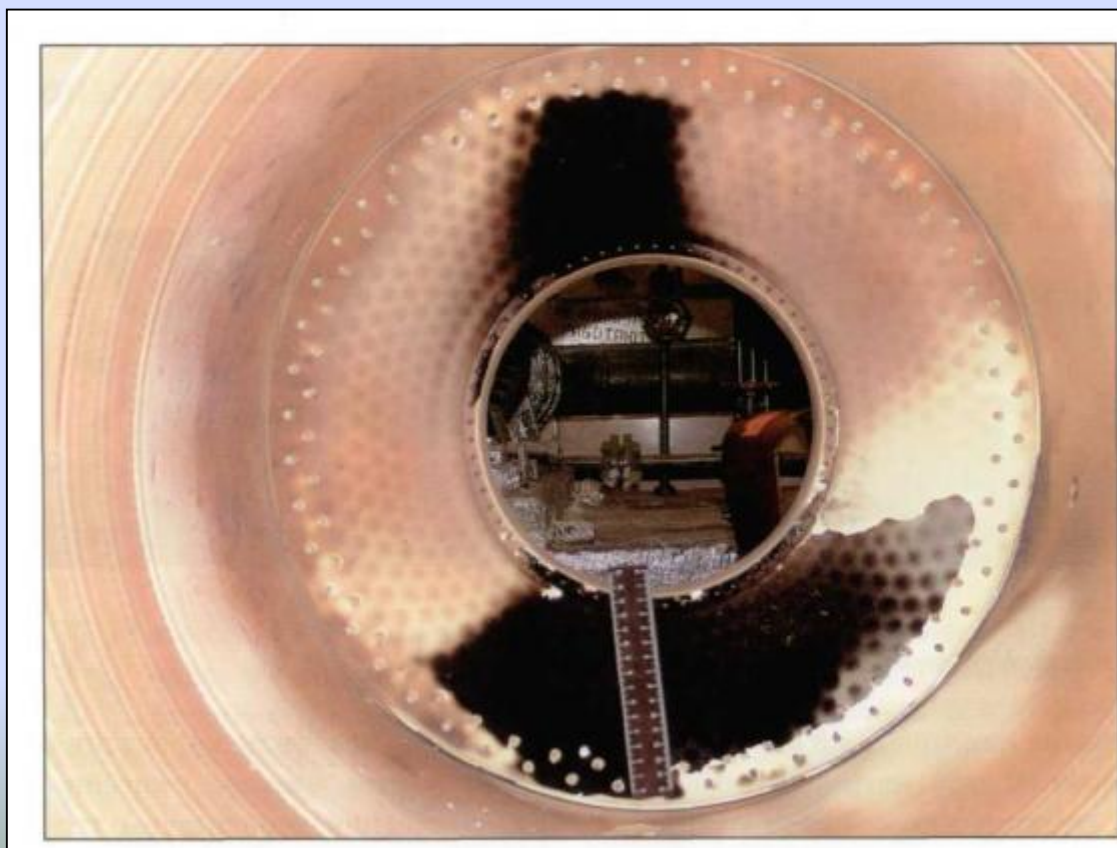


Охрана труда и экология

повышенные шумы и вибрация;
выбросы вредных веществ в
атмосферу;

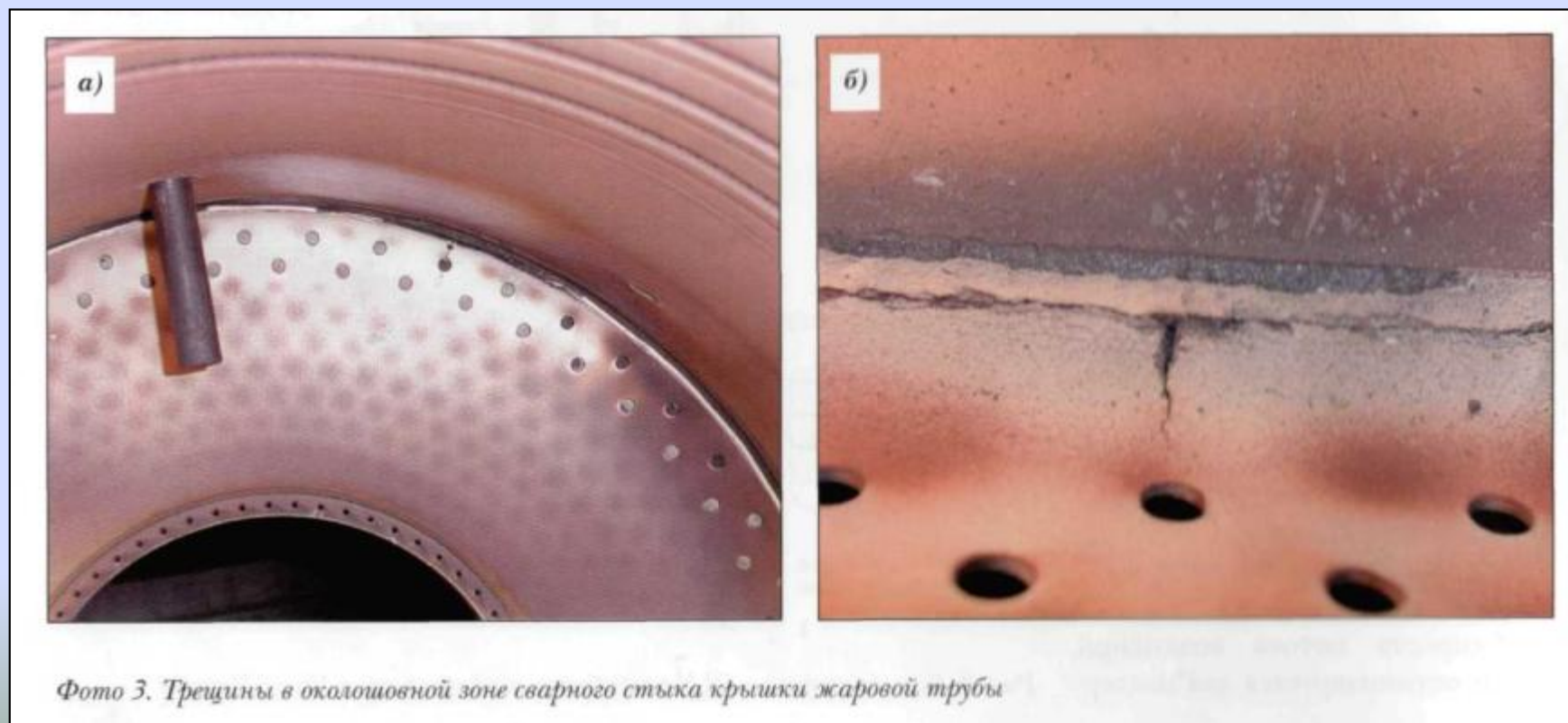
Дефекты по жаровым трубам

Отложение сажи на внутреннем корпусе крышки жаровых труб



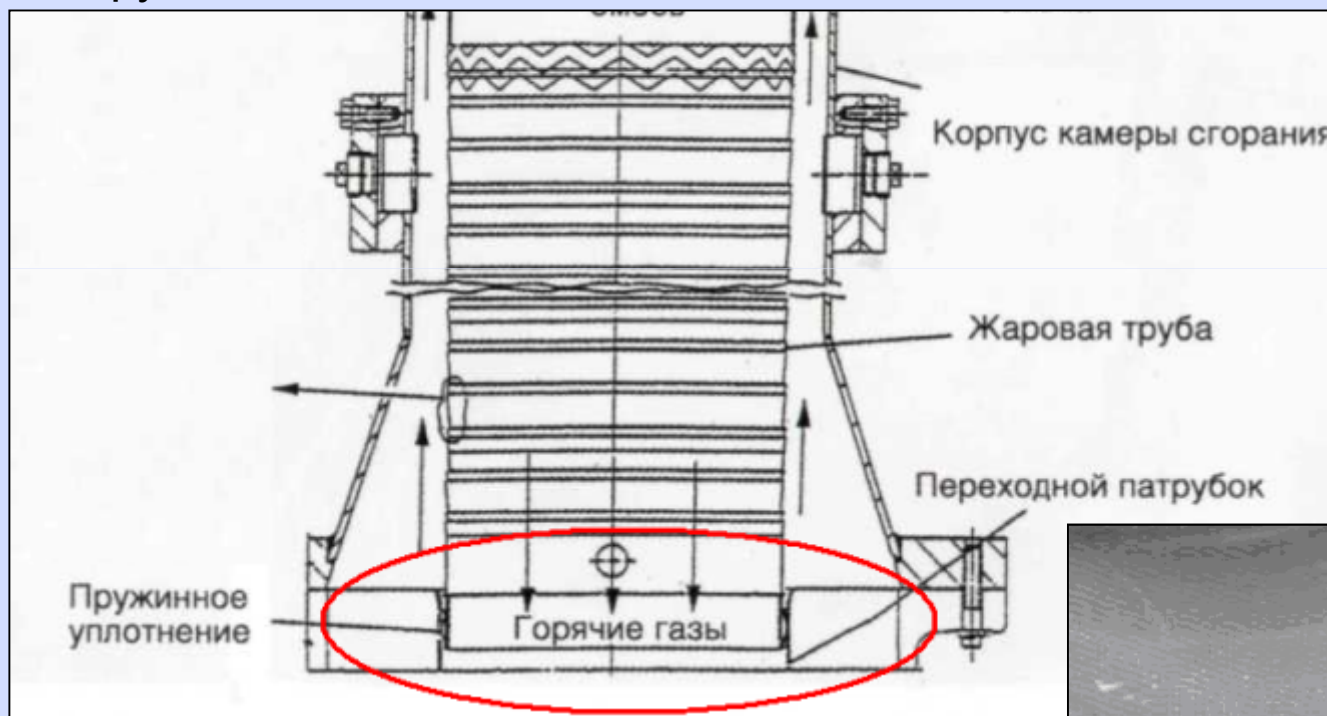
Дефекты по жаровым трубам

Разрушение защитного керамического покрытия и растрескивание металла на участке расположения отверстий для подачи газа



Дефекты по жаровым трубам

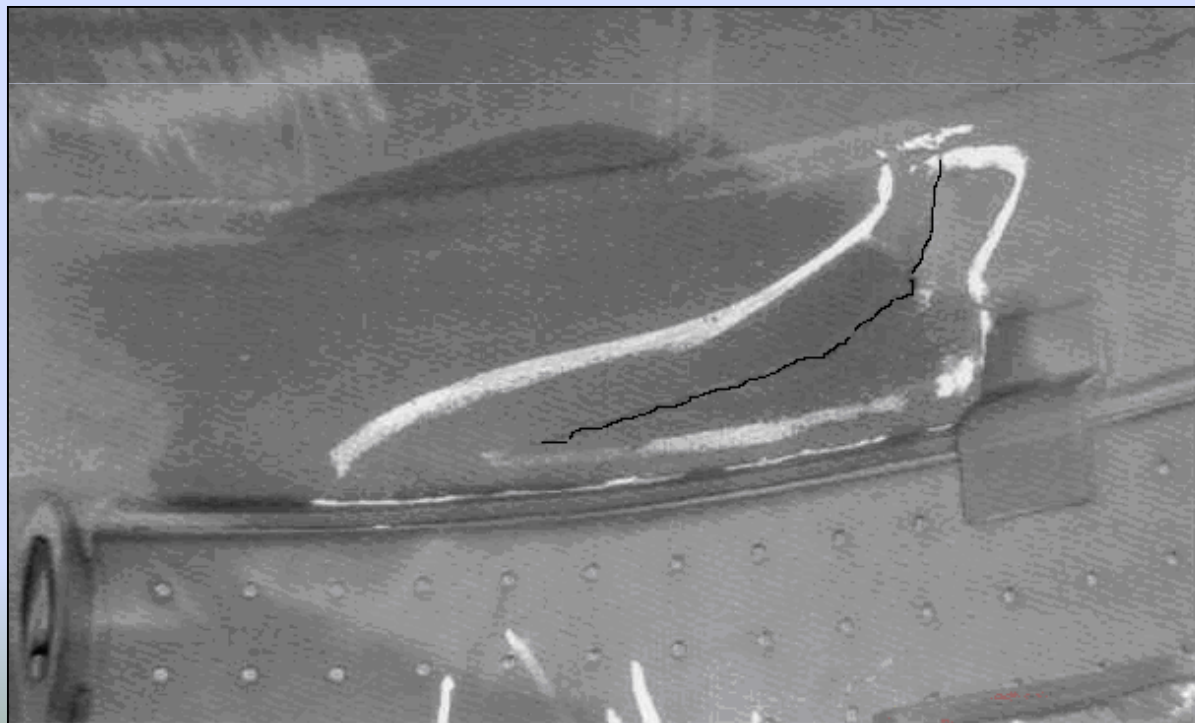
Износ концевых участков жаровой трубы в местах контакта с переходным патрубком



Дефекты по переходным патрубкам

Разрушение защитного керамического покрытия (местный перегрев стенки с образованием в ней трещин)

Возникновение трещин в местах крепления перфорированного экрана, связанное с производственными дефектами



Дефекты по горелочным устройствам КС и сопловому аппарату турбины

Высокотемпературные повреждения в виде коррозии, эрозии и сквозных прогаров

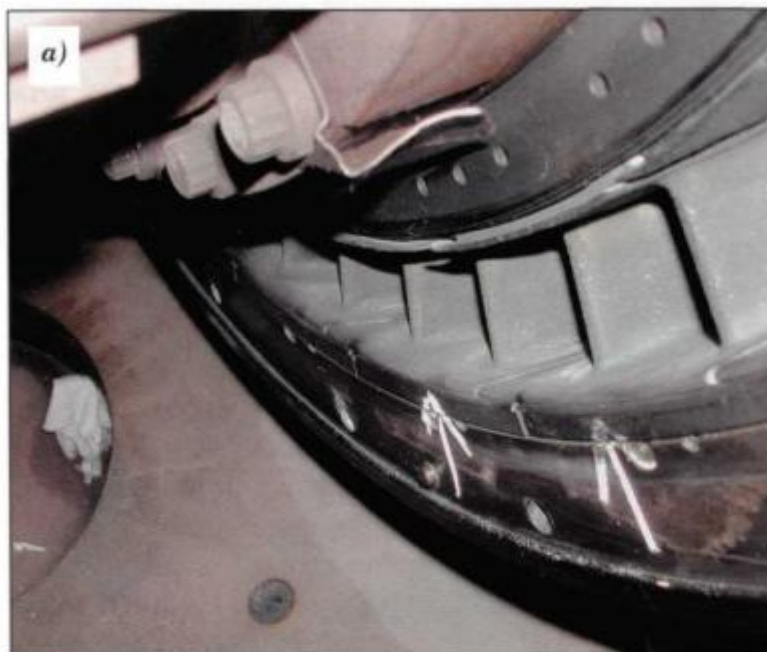
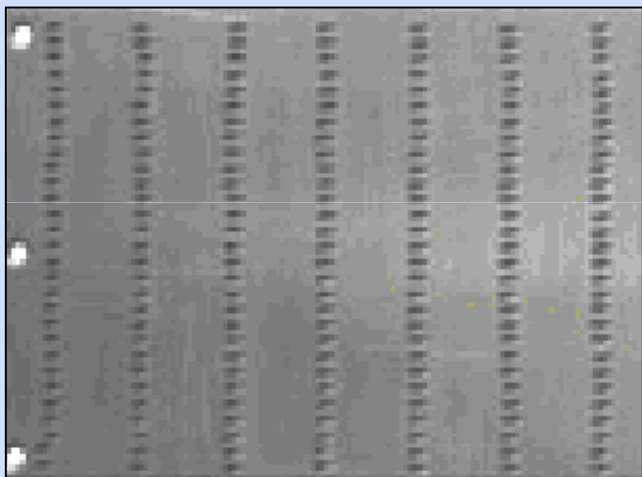
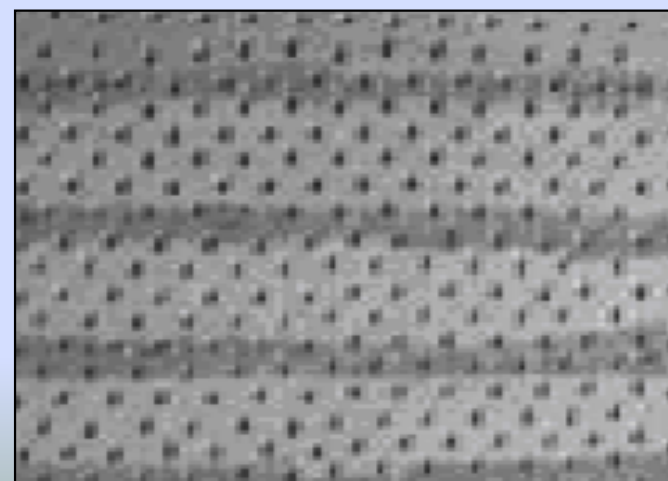
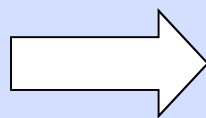


Фото 5. Высокотемпературные повреждения в виде коррозии, эрозии входных кромок и нижних полок лопаток. Сквозной прогар нижних полок направляющих лопаток ТВД

Повышение надежности конструкции и увеличение долговечности работы КС



Отверстия в стенке жаровой трубы типа «жалюзи» были заменены на окружности диаметров 1,8 мм, что позволило увеличить скорость охлаждения стенки трубы до 15%



Благодарю за внимание!

Перечень рекомендуемой литературы по Модулю 5



Основная:

- Газотурбинные установки: учебное пособие/ А.В. Рудаченко, Н.В. Чухарева, С.С. Байкин.– Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 139с.
- Энергетика трубопроводного транспорта газов: Учебное пособие / А.Н. Козаченко, В.Н. Никишин, Б.П. Поршаков – М.: ГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2001. – 400 с.
- Манушин Э.А. Газовые турбины. Проблемы и перспективы. М.: Энергоатомиздат, 1986.- 168 с.

Дополнительная:

- Газотурбинные технологии. Специализированно-аналитический журнал. Изд-во «Медиа Гранд»
- ГОСТ 4.433-86. Установки газотурбинные стационарные. Но-менклатура показателей.
- ГОСТ 21199-82. Установки газотурбинные. Общие техниче-ские требования.
- Повышение эффективности использования газа на компрессорных станциях / Динков В.А., Гриценко А.И., Васильев Ю.Н., Мужиливский П.М. - М.: Недра, 1981,- 296 с