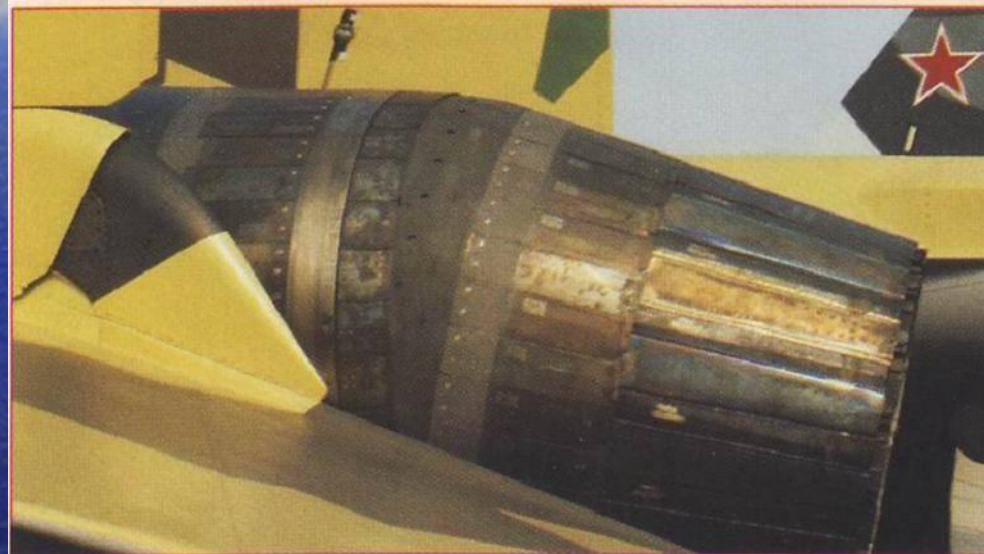


# Выхлопное устройство Сопловой аппарат

# Сопловой аппарат Су-27



Сопла с изменяемым вектором тяги, которыми оснащены все самолеты Су-27 придают машине исключительную маневренность, и прежде всего позволяют отклонять нос от направления полета на длительные периоды времени. Вектор тяги отклоняется на  $\pm 15^\circ$  в вертикальной плоскости.



**Сопло** выполняет две основные функции:

- служит для преобразований тепловой и потенциальной энергии газа в кинетическую энергию вытекающей струи, т.е. для увеличения динамического импульса газовой струи на выходе из двигателя и, соответственно, для увеличения тяги;
- Обеспечивает заданную пропускную способность (определенное противодавление) на выходе из двигателя, тем самым с помощью сопла согласовываются режимы работы турбины и компрессора.
- Диффузорное выходное устройство служит для уменьшения давления за турбиной, т.е. для повышения теплоперепада на турбине и, соответственно увеличение мощности двигателя.

- **Выходное устройство ГТД** - Часть газотурбинной силовой установки, включающая реактивное сопло, реактивное сопло с шумоглушителем, отклоняющее устройство реактивного сопла со средствами его регулирования, сопло ТВД
- **Реактивное сопло ГТД** - Устройство, в канале переменного сечения которого происходит ускорение потока воздуха или газа с целью создания реактивной тяги
- **Суживающееся реактивное сопло** - Реактивное сопло ГТД, поперечное сечение которого уменьшается в направлении движения потока газа
- **Суживающееся-расширяющееся реактивное сопло** - Реактивное сопло ГТД, поперечное сечение которого в направлении движения потока газа сначала уменьшается, а затем увеличивается
- **Сверхзвуковое реактивное сопло** - Реактивное сопло ГТД, предназначенное для ускорения потока газа до сверхзвуковой скорости
- **Коническое сверхзвуковое реактивное сопло**
- **Реактивное сопло с центральным телом** - Реактивное сопло ГТД, кольцевой канал которого образован центральным телом и



- **Осесимметричное реактивное сопло** - Сопло, поверхность которого со стороны потока газа (воздуха) является осесимметричной
- **Неосесимметричное реактивное сопло** - Реактивное сопло ГТД, не имеющее оси симметрии
- **Плоское реактивное сопло** - Реактивное сопло ГТД, две боковые стенки которого параллельны друг другу и любое поперечное сечение имеет прямоугольную форму
- **Поворотное реактивное сопло** - Реактивное сопло ГТД, которое может поворачиваться для изменения направления вектора тяги
- **Нерегулируемое реактивное сопло** - Реактивное сопло ГТД, размеры критического и выходного сечений которого не изменяются при изменении режимов работы двигателя
- **Регулируемое реактивное сопло** - Реактивное сопло ГТД, размеры критического и выходного сечений которого изменяются при изменении режимов его работы



# Регулируемые сопла



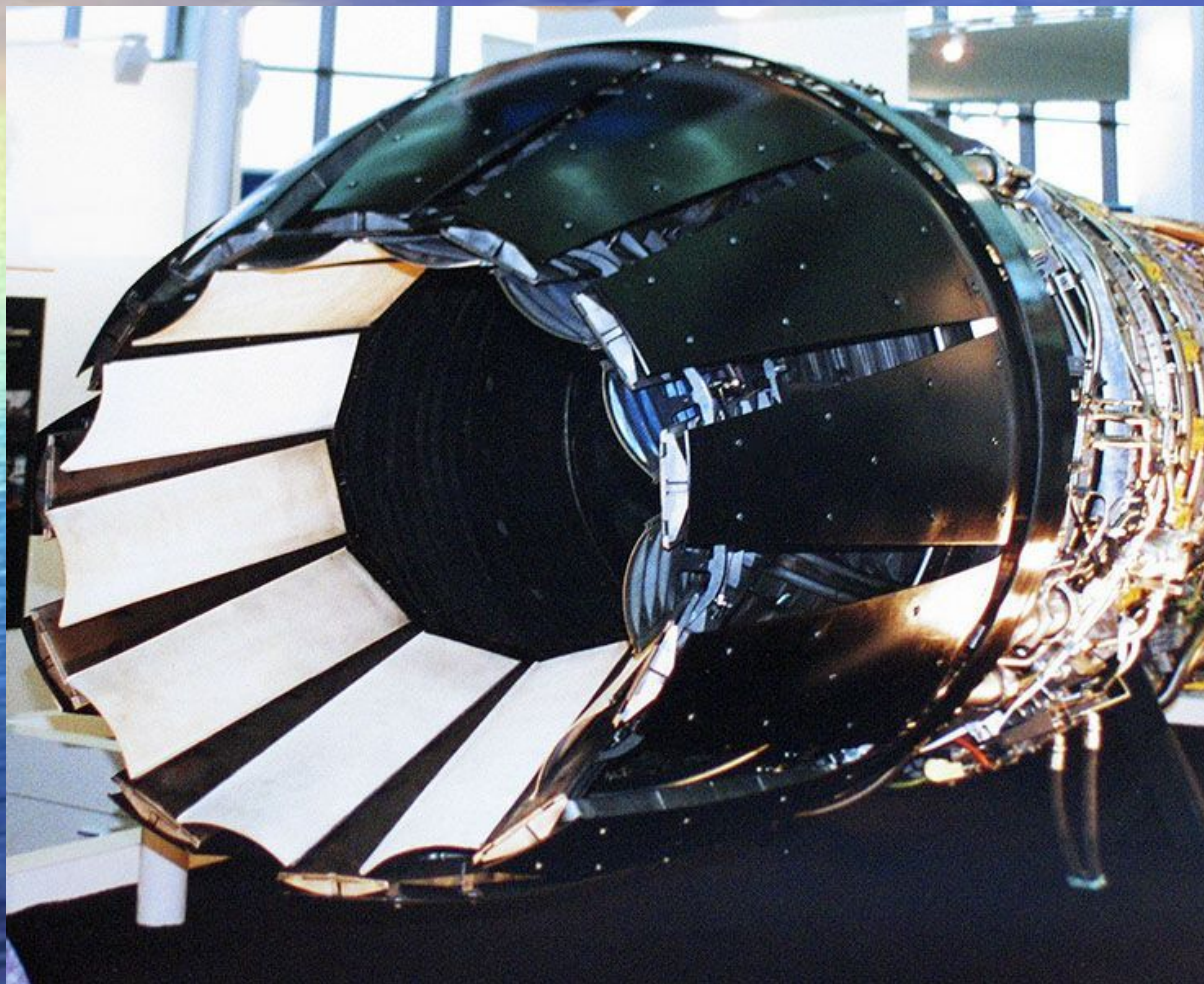
РД, скорость истечения реактивной струи в которых может быть как дозвуковой, так и сверхзвуковой на различных режимах работы двигателей, оборудуются регулируемыми соплами. Эти сопла состоят из продольных элементов, называемых *створками*, подвижных относительно друг друга и приводимых в движение специальным приводом, как правило гидравлическим или механическим, позволяющим по команде пилота или автоматической системы управления двигателем изменять геометрию сопла. При этом изменяются размеры критического (самого узкого) и выходного сечений сопла, что позволяет оптимизировать работу двигателя при полётах на разных скоростях и режимах работы двигателя. Регулируемые сопла применяются в основном в военной авиации на ТРД и ТРДД с форсажной камерой



F-16 Fighting Falcon



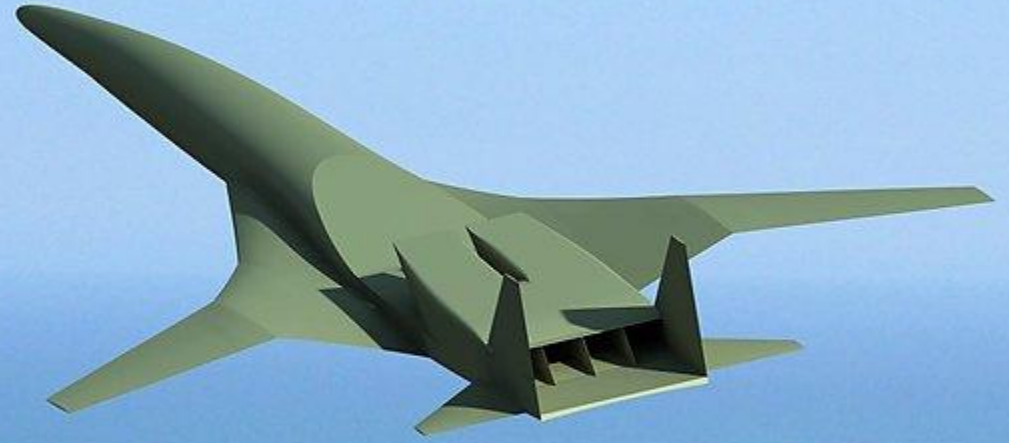
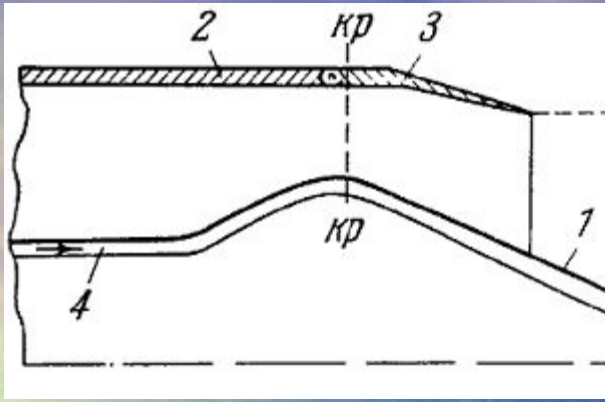
# Управление вектором тяги (УВТ) / Отклонение вектора тяги (ОВТ)



Специальные поворотные сопла, на некоторых ТРДД, позволяют отклонять истекающий из сопла поток рабочего тела относительно оси двигателя. ОВТ приводит к дополнительным потерям тяги двигателя за счёт выполнения дополнительной работы по повороту потока и усложняют управление самолётом. Но эти недостатки полностью компенсируются значительным повышением маневренности и сокращением разбега самолёта при взлете и пробега при посадке, до вертикальных взлета и посадки включительно. ОВТ используется исключительно в военной авиации.







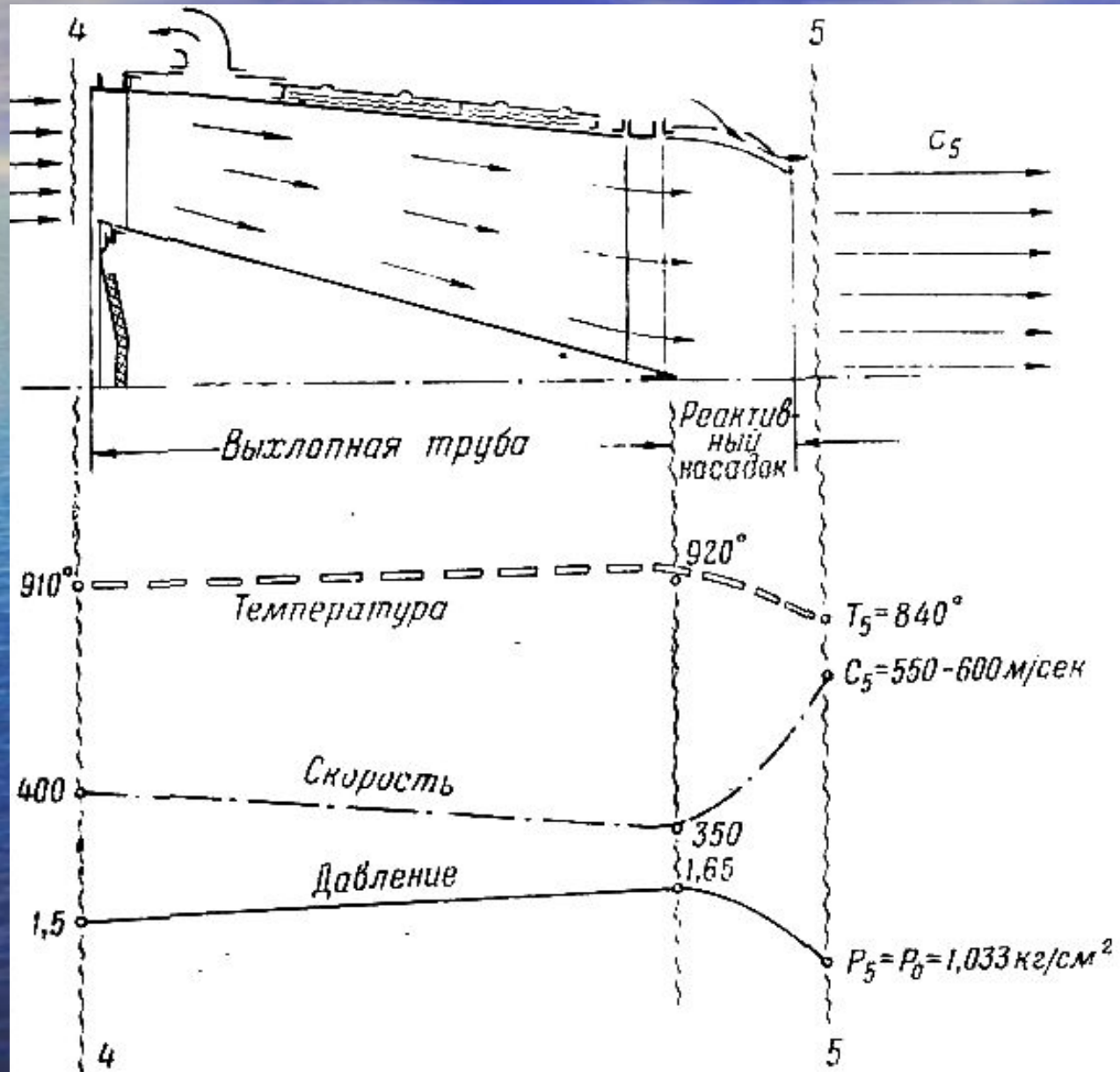








# Изменение параметров газа в выхлопной трубе и реактивном насадке





# Реверс тяги

- *Реверс тяги изменение направления вектора тяги на противоположное необходим для уменьшения длины пробега самолета при посадке на аэродроме или при прерванном взлете и повышения маневренности летательных аппаратов военных и спортивных в воздухе*

Гидроавиационные винты в системе питания винтами Аэрофлота, от которых Ан-12 продолжают использоваться для снабжения полярных экспедиций. Эпюлет самолета был сфотографирован в Астанине, где располагается заводская база фирмы, которая занимается разработкой нефтяных и газовых месторождений.



На турбовинтовых двигателях отрицательную тягу получают путем изменения угла установки лопастей винта.

- На турбореактивных - путем изменения направления движения выходной струи газа на противоположное. Фактически угол поворота потока меньше  $180^\circ$  (примерно на  $45^\circ$ ), чтобы избежать попадания горячей струи на вход в двигатель.

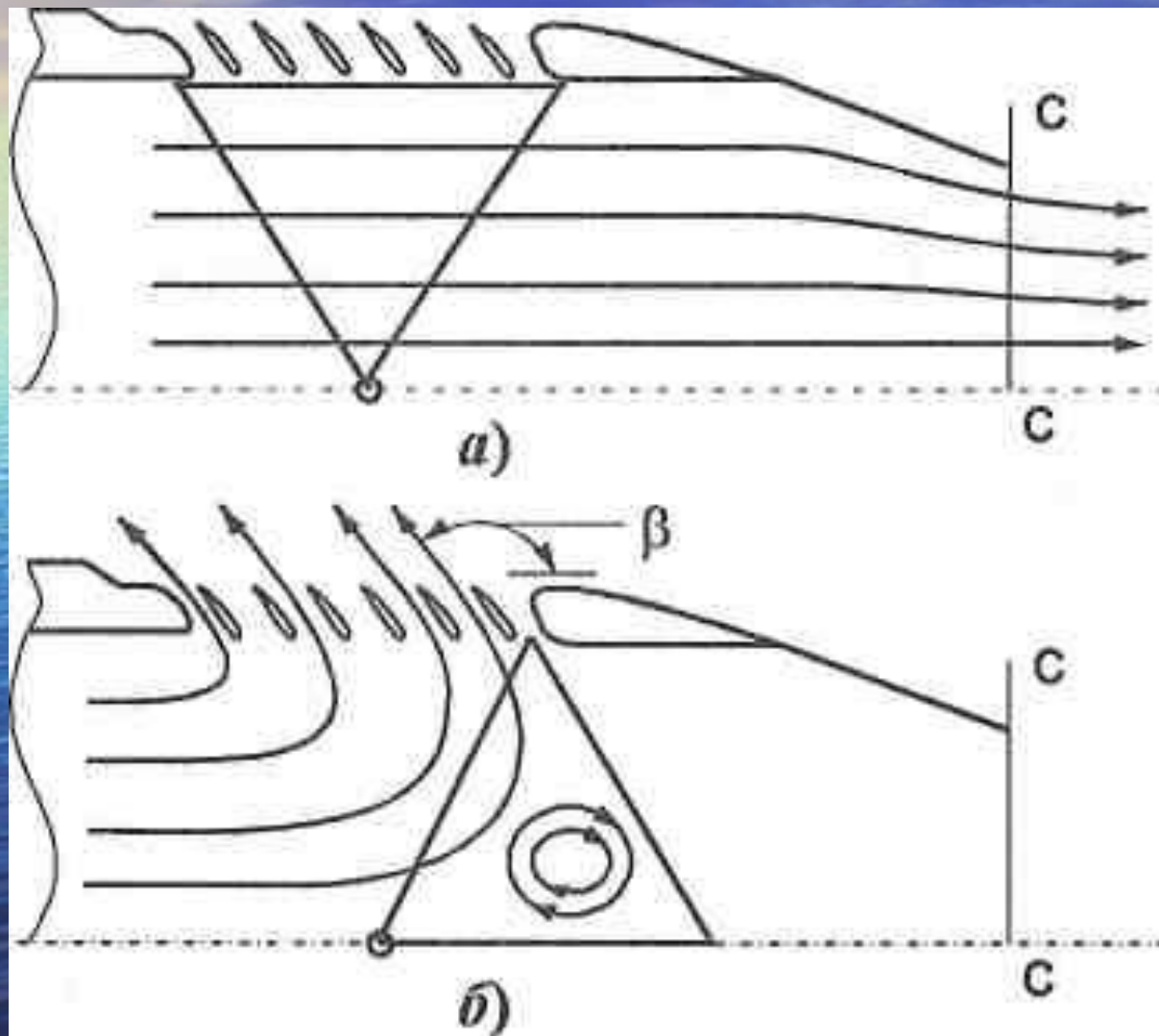




# Эффективность работы реверсивного устройства

- Эффективность работы реверсивного устройства оценивается коэффициентом реверса тяги сопла  $P_{рев}$ , которым называют отношение величины отрицательной тяги сопла на режимах реверса к величине  $P$  положительной тяги при работе турбокомпрессора двигателя на том же режиме

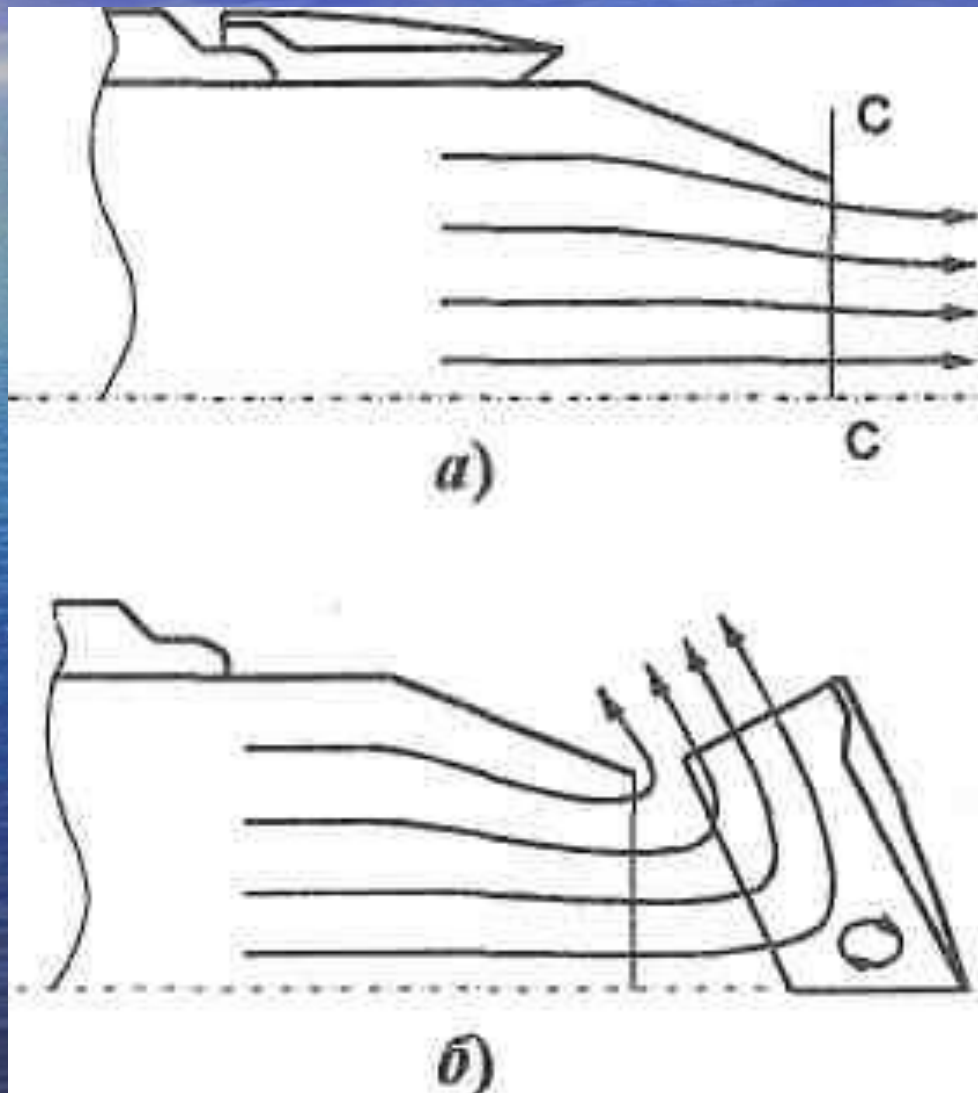
# Схема решетчатого реверсивного устройства



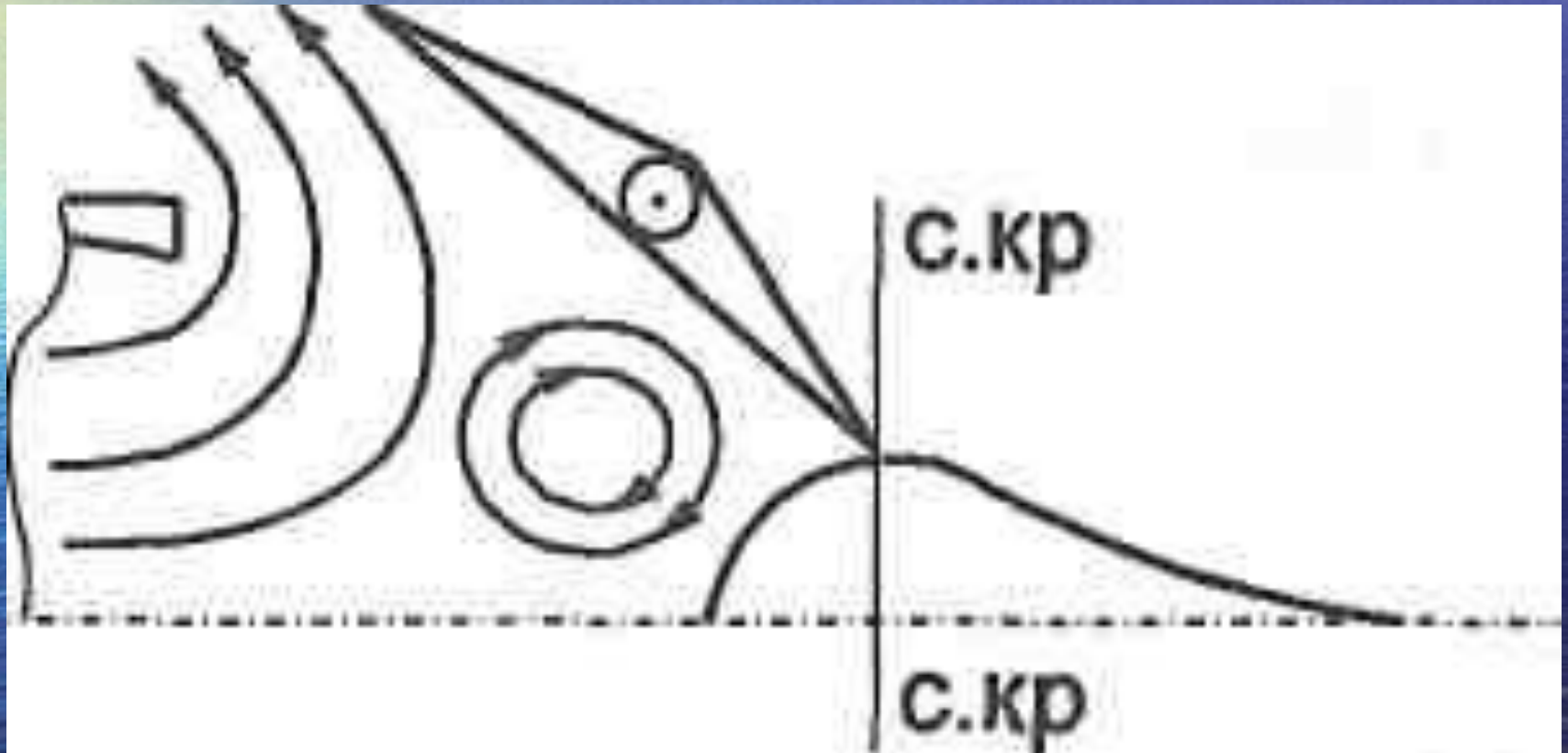
Режимы  
прямой тяги (а)  
реверса (б)



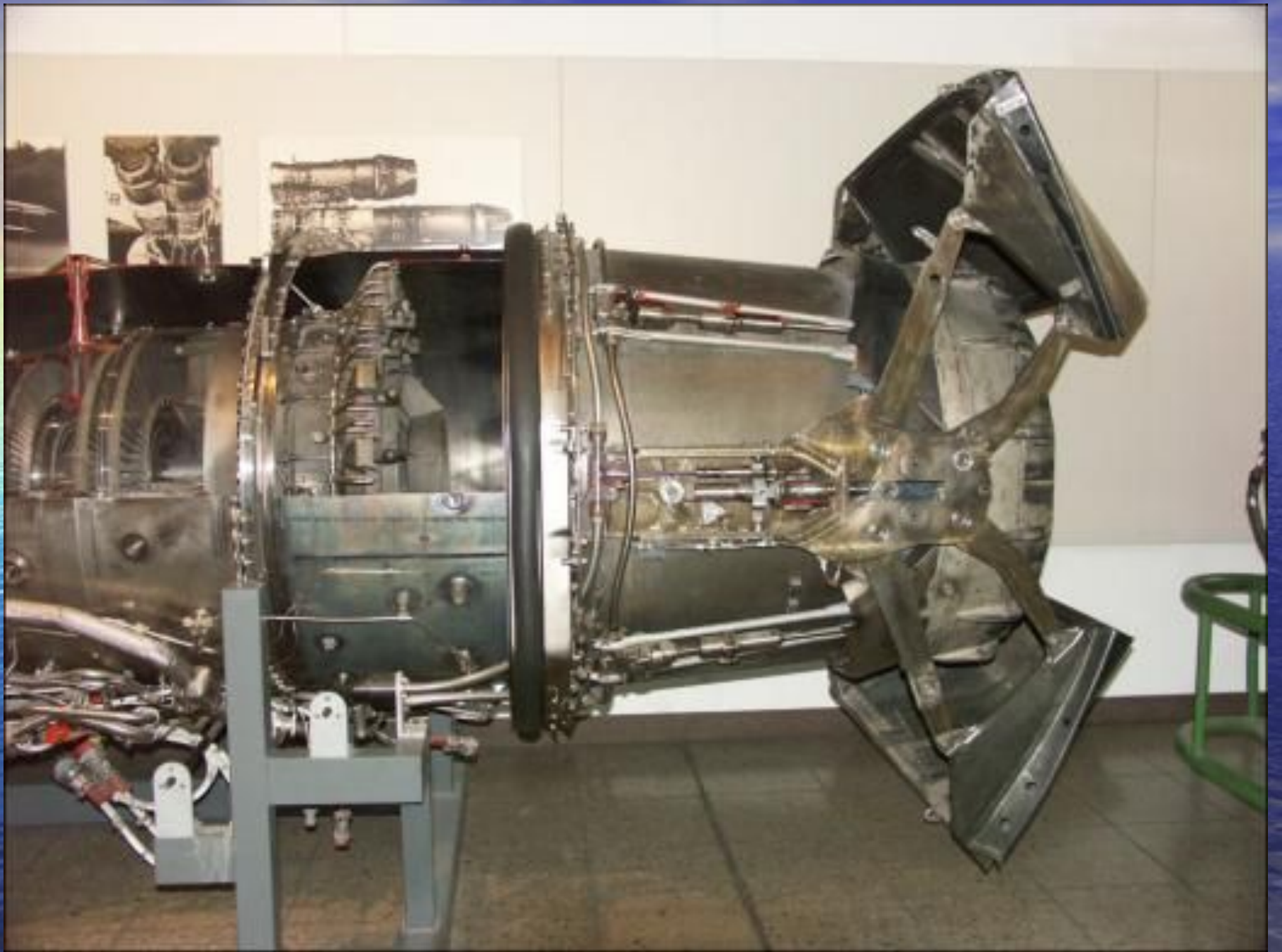
# Схема ковшового реверсивного устройства



# Схема створчатого реверсивного устройства









Работа реверса на А-321



# ФОРСИРОВАНИЕ ТЯГИ ТРД

**Форсирование тяги** — это кратковременное увеличение тяги данного двигателя по сравнению с расчетной (номинальной).

Повышение тяги необходимо:

- при взлете
- разгон до сверхзвуковой скорости
- набор высоты с целью занятия выгодной позиции для атаки в воздушном бою, где нужно быстро догнать и атаковать противника
- экстренный выход из боя
- преодоление зоны действия ПВО противника

# Способы форсирования ГТД

1. Повышение температуры газов перед турбиной.
2. Охлаждение воздуха, сжимаемого в компрессоре.
3. Дополнительное сжигание топлива за турбиной.



# 1 Способ форсирования двигателя - Повышение температуры газов перед турбиной

- Повышение температуры газов перед турбиной увеличивает работоспособность газов, как следствие, мощность, развиваемую турбиной

$$L_{РАСШ} = \frac{k}{k-1} R(T_3 - T_4).$$

- Увеличение мощности турбины увеличивает число оборотов турбины и компрессора и, как результат этого, увеличивается секундный расход воздуха.
- Увеличение температуры  $T_3$  увеличивает температуру перед реактивным насадком, что в свою очередь увеличивает скорость истечения газов.
- Увеличение же секундного расхода воздуха и скорости истечения газов увеличивает тягу двигателя.

# Недостатки повышения температуры газов перед турбиной

- увеличение температуры газов перед турбиной ограничено жаропрочностью материала лопаток (для имеющихся сплавов температура газов не должна превышать  $1500^{\circ}\text{C}$ )
- повышение числа оборотов сверх 4—8% от расчетных (номинальных) недопустимо из-за возможности обрыва лопаток турбины.



## 2. Охлаждение воздуха, сжимаемого в компрессоре.

- Охлаждение воздуха, сжимаемого в компрессоре, охлаждающей жидкостью, впрыскиваемой в поток воздуха. Охлаждающие жидкости вода, спирт, их смеси, аммиак и т. д.— охлаждают воздух, отнимая от него тепло на свое испарение.
- Так как количество сжимаемого воздуха остается постоянным ( $G_{\text{СЕК}} = \text{пост.}$ ), то, затрачивая ту же мощность турбины, компрессор будет сжимать воздух до большего давления.
- Перепад давления, срабатываемый в турбине, остается постоянным; перепад же давления, срабатываемый в реактивном насадке, увеличивается, а это приводит к увеличению скорости истечения газов и, следовательно, тяги двигателя.
- Чаще всего для охлаждения воздуха, сжимаемого в компрессоре, в поток воздуха на всасывании впрыскивают воду.
- Однако применение этого простого способа форсирования требует больших расходов воды.

# Работа на сжатие воздуха в компрессоре

$$L_{\text{ДЕЙСТВ}} = \frac{k}{k-1} R(T_2 - T_1) + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g}$$

$$P_{\text{ВЫХ}} = P_2 \left[ 1 + \frac{c_2^2 - c_{\text{ВЫХ}}^2}{2000T_2} \right]^{3,5}$$

Система впрыска воды двигателя М601



### 3 Способ форсирования двигателя Дополнительное сжигание топлива между турбиной и реактивным насадком в форсажной камере.

- **Преимущество использования форсажной камеры** состоит в том, что она дает возможность кратковременно значительно увеличить тягу двигателя без увеличения температуры газов перед турбиной и без увеличения лобовой площади двигателя. По мере роста скорости полета форсажные камеры становятся все более эффективным устройством для кратковременного увеличения тяги и широко применяются на современных ТРД.
- **Недостатком форсажных камер:**
  - усложнение конструкции двигателя и увеличение его веса. При форсировании тяги указанным выше способом увеличивается удельный расход топлива. при увеличении температуры перед реактивным насадком на 70% удельный расход топлива увеличивается почти на 65%, а удельная тяга — только на 30%.
  - Влияние температуры при форсировании ТФОРС на удельный расход топлива и удельную тягу показано на рис. 40.
- При неработающей форсажной камере ее детали создают дополнительное сопротивление течению газа в двигателе, что незначительно уменьшает тягу двигателя и ухудшает его экономичность по сравнению с двигателем без форсажной камеры.



# Форсажная камера

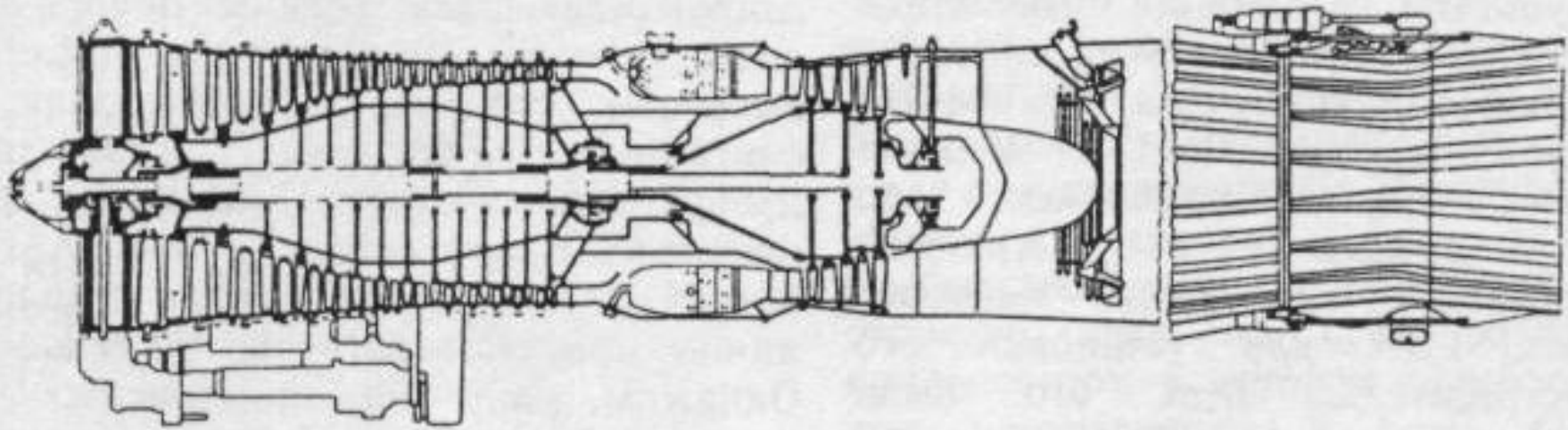


**Форсажная камера** (форкамера или ФК) — камера камера\_камера сгорания в турбореактивном двигателедвигателе, расположенная за его турбиной.

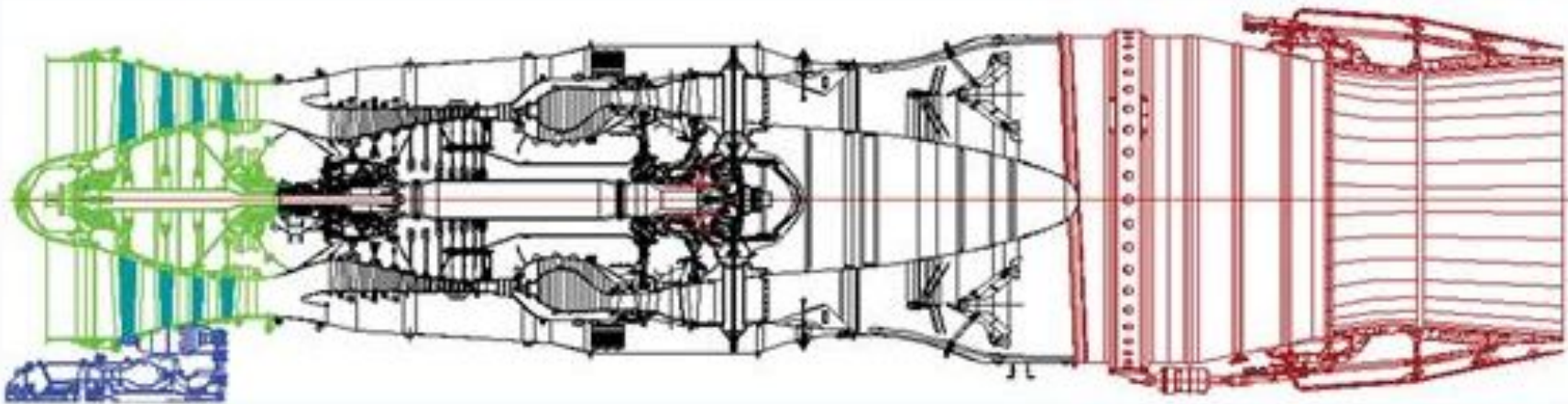
В турбореактивном двигателе имеется избыток кислородаВ турбореактивном двигателе имеется избыток кислорода в камере сгорания, но этот резерв мощности не удаётся реализовать простым увеличением подачи горючегоВ турбореактивном двигателе имеется избыток кислорода в камере сгорания, но этот резерв мощности не удаётся реализовать простым увеличением подачи горючего — из-за конструктивных ограничений (по температуре, температура газов перед турбиной обычно составляет 1200-1600 °К) лопаток турбины, на которые поступают горячие газы. Для повышения тягиВ турбореактивном двигателе имеется избыток кислорода в камере сгорания, но этот резерв мощности не удаётся реализовать простым увеличением подачи горючего — из-за конструктивных ограничений (по температуре, температура газов перед турбиной обычно составляет 1200-1600 °К) лопаток турбины, на которые поступают горячие газы. Для



АЛ-21Ф-3. Су-24, Су-17, МИГ-23



Двигатель **АЛ-31** Су-27, Су-30



Включение форсажа всегда сопровождается интенсивным расходом топлива и повышением тепловых и механических нагрузок на двигатель, то такие двигатели обычно устанавливаются на самолётах военного назначения форсажа всегда сопровождается интенсивным расходом топлива и повышением тепловых и механических нагрузок на двигатель, то такие двигатели обычно устанавливаются на самолётах военного назначения, для обеспечения, такой ценой, превосходства форсажа всегда сопровождается интенсивным расходом топлива и повышением тепловых и механических нагрузок на двигатель, то такие двигатели обычно устанавливаются на самолётах военного назначения, для обеспечения, такой ценой, превосходства в бою форсажа всегда сопровождается интенсивным расходом топлива и повышением тепловых и механических нагрузок на двигатель, то такие двигатели обычно устанавливаются на самолётах военного назначения, для обеспечения,



# F/A-18



# АЛ-31ФП на форсаже





# Су-27, взлет, форсаж







