

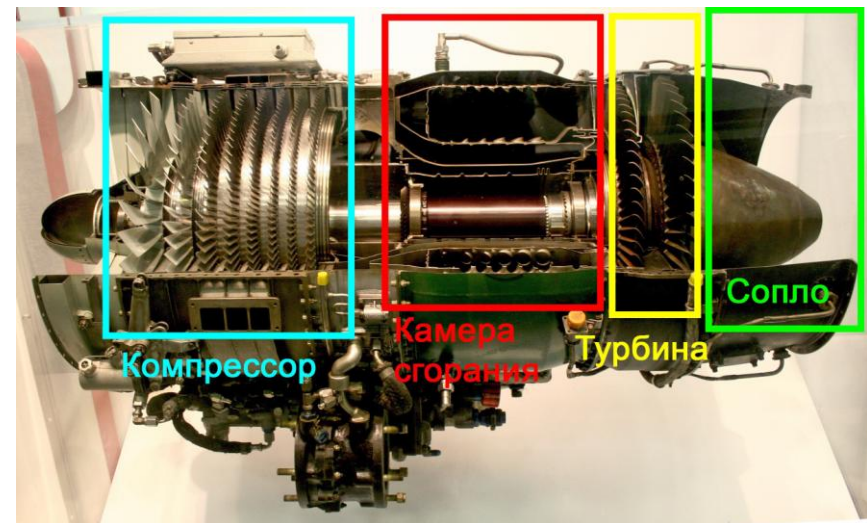
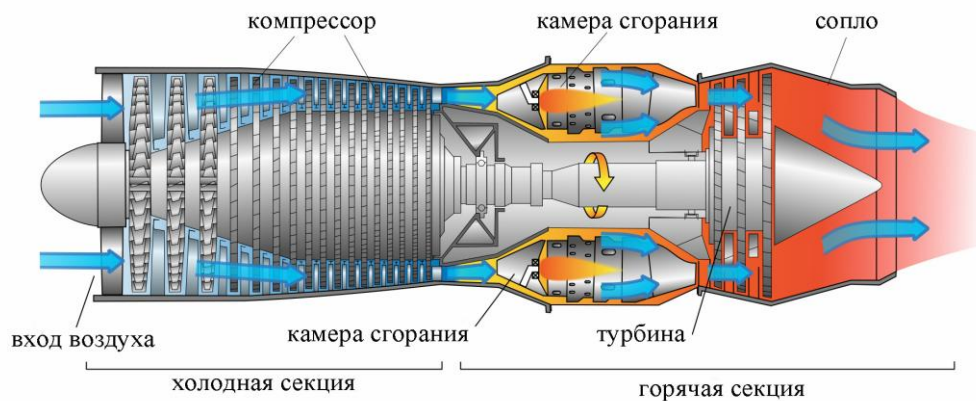
МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ШУМА ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ

ШУМ ТУРБОРЕАКТИВНЫХ И ТУРБОВЕНТИЛЯТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И МЕТОДЫ ЕГО СНИЖЕНИЯ

Переход к двухконтурным (турбовентиляторным) двигателям

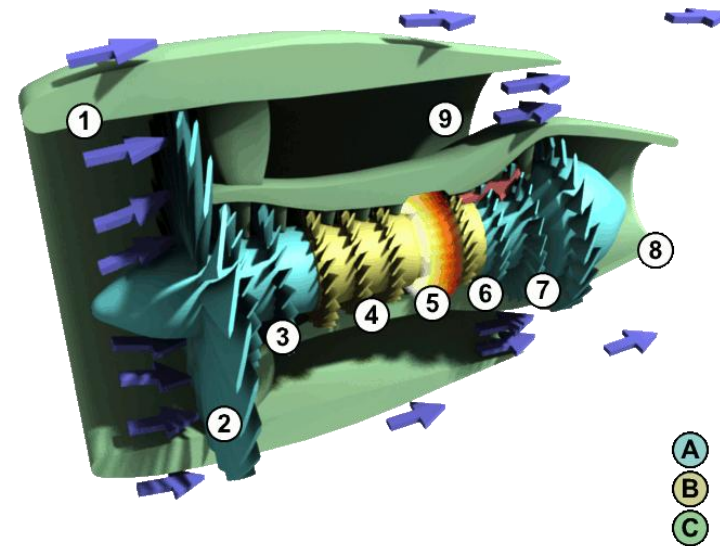
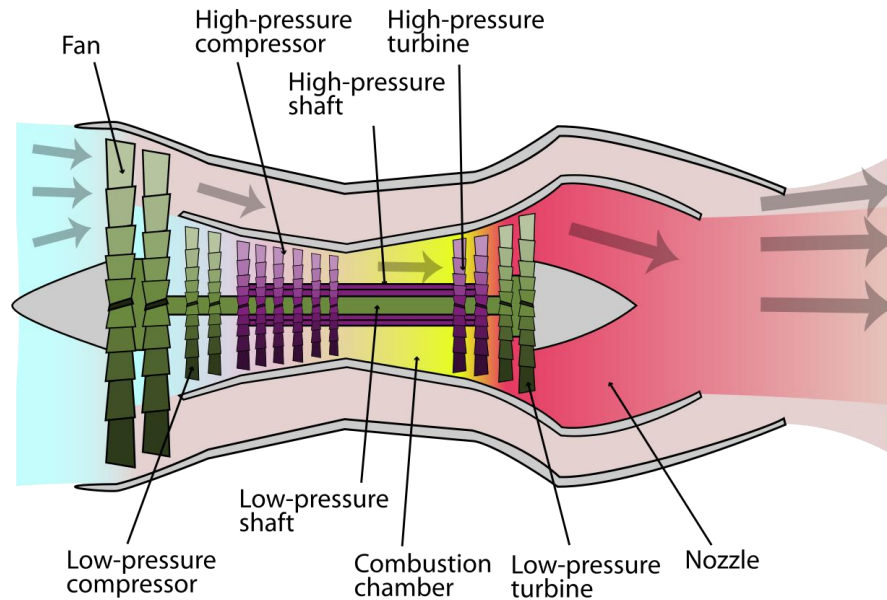
Турбулентная струя является одним из основных источников шума турбореактивных двигателей (в некоторых случаях – основным). Поскольку акустическая мощность шума турбулентной струи пропорциональна 8-й степени скорости истечения струи ($W \sim U^8$), наиболее эффективным методом снижения шума является уменьшение скорости струи. Но при этом тяга двигателя не должна снижаться.

Турбореактивный двигатель (ТРД) (один контур)



Тяга двигателя пропорциональна импульсу струи, а не скорости, поэтому снижая среднюю скорость струи и увеличивая при этом массу отбрасываемого назад воздуха (проходящего через двигатель), можно снизить скорость струи, не снижая тяги.

Двухконтурный турбореактивный двигатель (ТРДД, ДТРД, ТВлД)



Степень двухконтурности (bypass ratio): $m = Q_2 / Q_1$,

где Q_1 - расход воздуха через первый (внутренний, горячий) контур, Q_2 - расход воздуха через второй (внешний, или холодный) контур.

Первые ТРДД: $m \approx 1$; современные ТВлД: $m \approx 10-12$.

Двухконтурные двигатели с большой степенью двухконтурности ($m > 2$) называются турбовентиляторными (ТВлД).

В СССР первый двухконтурный турбореактивный двигатель (Д-20П) был установлен на Ту-124, это был первый в мире пассажирский реактивный самолет с ТРДД (для региональных трасс).

Реальный ТРДД НК-86 (тяга 13 -13,5 Тонн) для широкофюзеляжного самолета Ил-86 на 350 пассажиров (УТЦ в аэропорту Пулково)

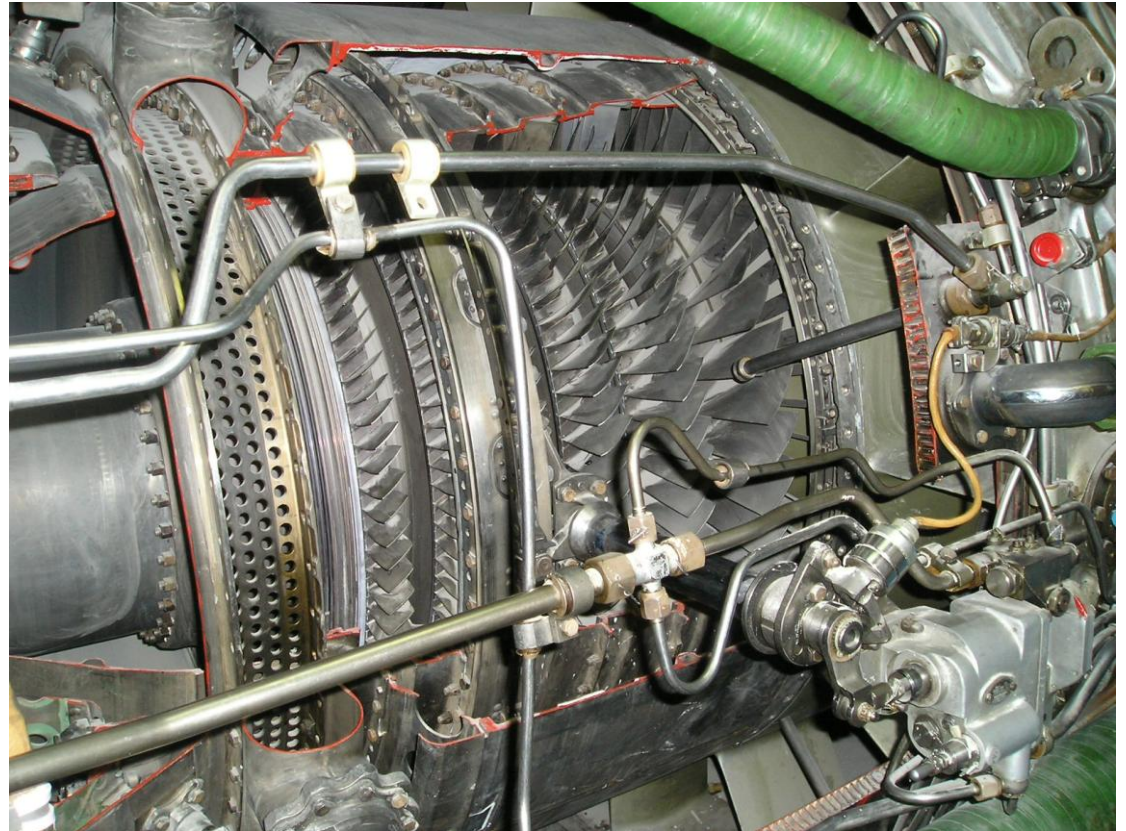
Общий вид двигателя



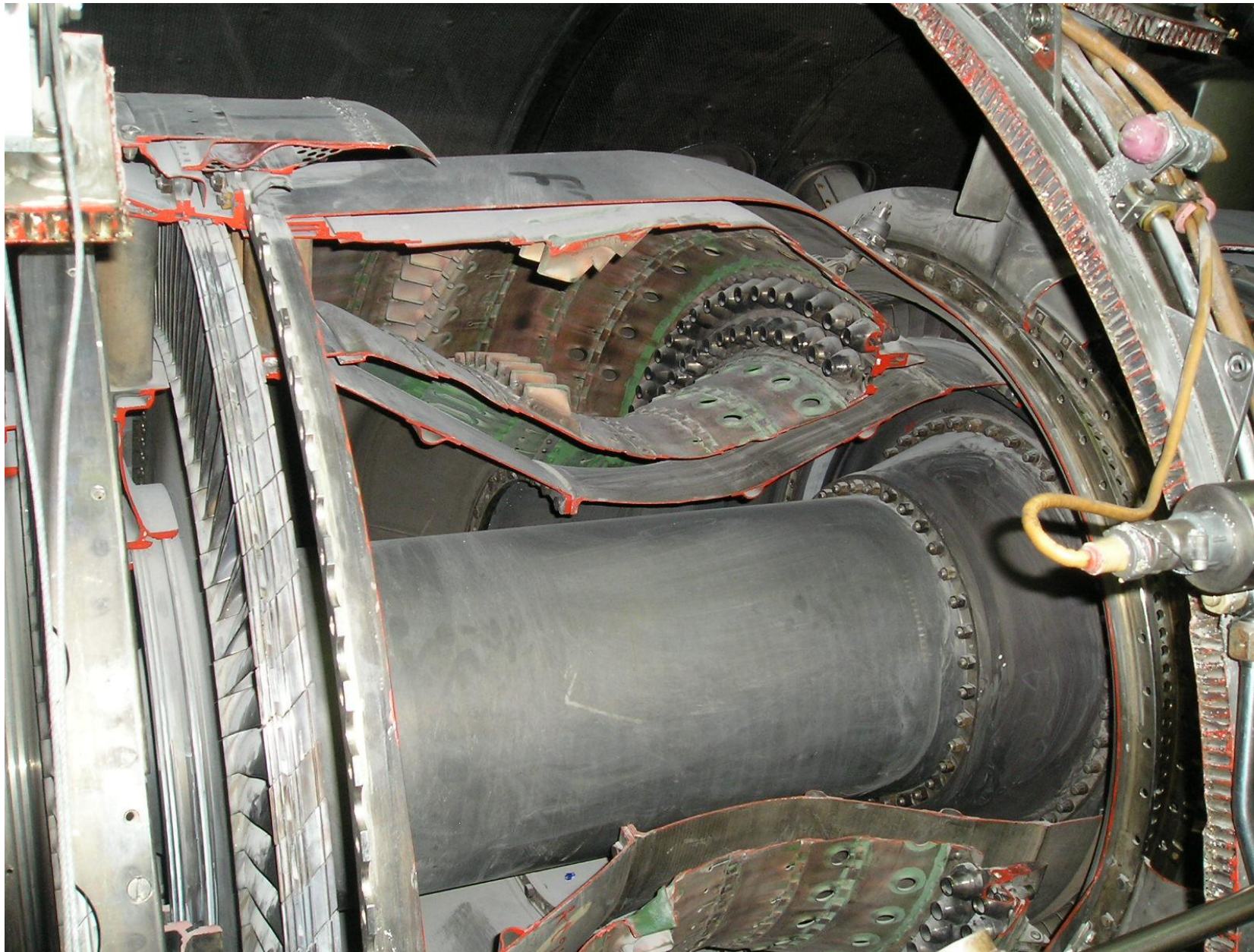
Вентилятор



Компрессор



Камера сгорания и первая ступень турбины

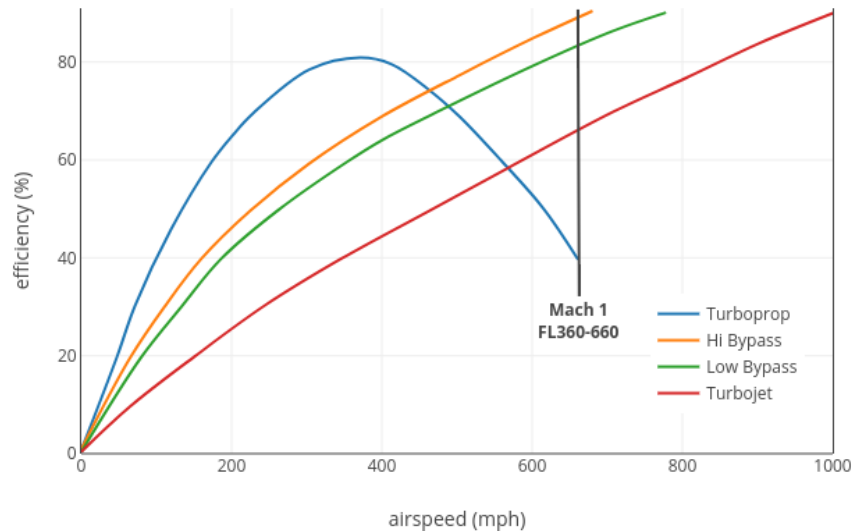


Камера сгорания и турбина, за смесителем – реверсивное устройство (с решетками) и сопло



Полётный (тяговый) к.п.д. $\eta = \frac{2}{1 + \frac{U_c}{U_n}}$, где U_c – скорость струи, U_n – скорость полёта.

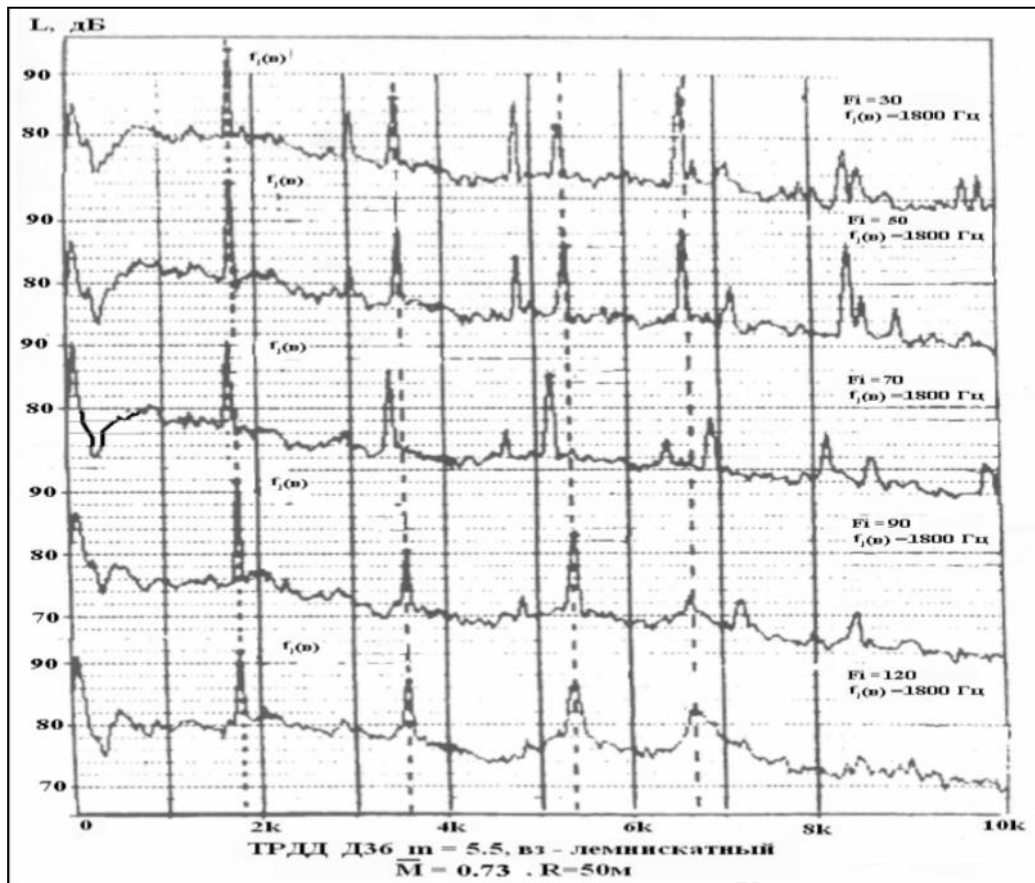
Propulsive efficiency comparison for various gas turbine engine configurations



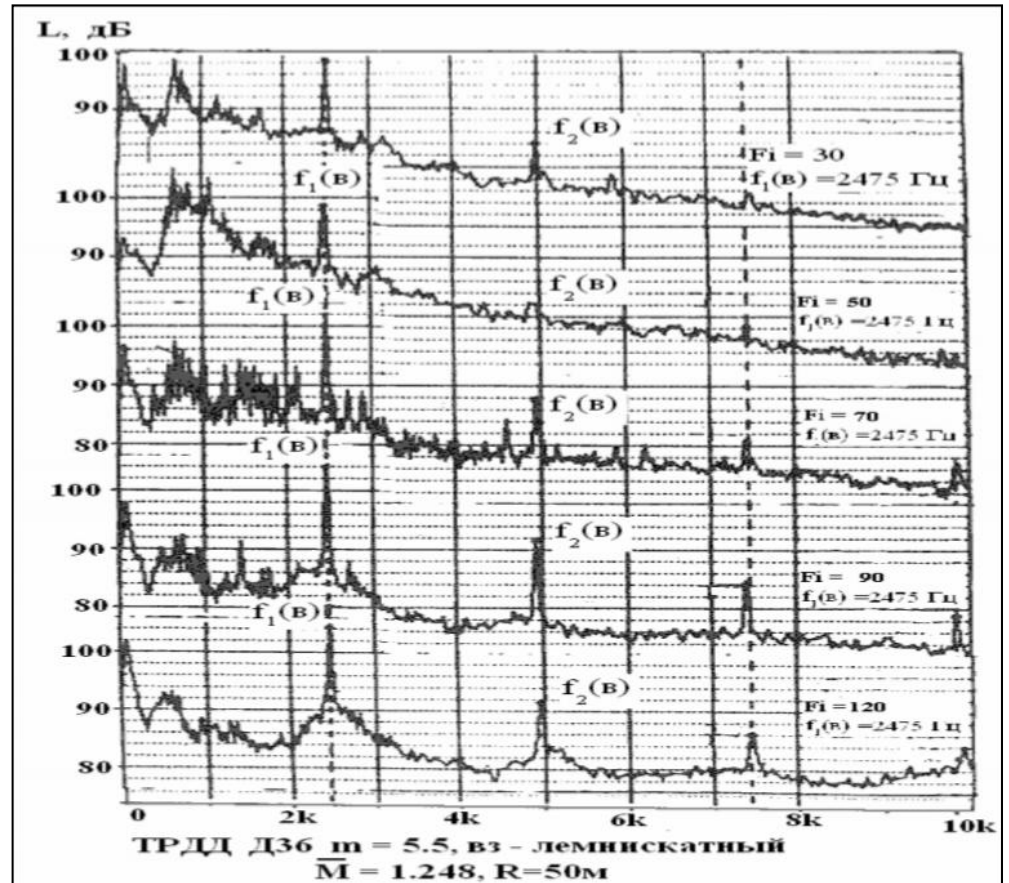
Общий к.п.д. = термодинамический к.п.д. × полётный к.п.д.

Двухконтурные двигатели позволили резко снизить шум струи, одновременно повысив полётный к.п.д. и экономичность двигателя. Благодаря этому струя во многих случаях (особенно на посадочных режимах) перестала быть основным источником шума двигателя. Лишь на взлетном режиме в задней полусфере шум струи доминирует.

Недостатки. У двигателей с высокой степенью двухконтурности резко увеличился шум вентилятора, особенно без ВНА (входного направляющего аппарата), причем такой шум часто воспринимается как неприятный («пилообразный» шум, возникающий при сверхзвуковых окружных скоростях лопастей вентилятора большого диаметра).



Спектр шума одноступенчатого вентилятора без ВНА при дозвуковой скорости РК (двигатель Д36, $M_{отн} = 0.73$)



Спектр шума одноступенчатого вентилятора без ВНА при сверхзвуковой скорости РК (двигатель Д36, $M_{отн} = 1,248$)

С увеличением степени двухконтурности увеличиваются диаметр двигателя и его лобовое сопротивление, что может привести к необходимости изменять конструкцию и систему управления самолета не лучшим образом. (негативный пример – Boeing-737 MAX с двигателем LEAP-1B).



Boeing-737-200 (конец 1960-х гг.,
двигатели P & W JT8D-9)



Boeing-737 MAX (2016, двигатели LEAP-1B):

Изменение расположения двигателей из-за увеличенного диаметра, нарушение балансировки, установки системы MCAS (улучшение маневренных характеристик). Эксплуатация март 2017- март 2019, 2 катастрофы, запрет на полеты после катастрофы в Эфиопии 10 марта 2019, приостановка производства, консервация всего парка самолетов (в т.ч. в пустынях Австралии и Аризоны) – сотни самолетов. Возобновление полетов – 20 декабря 2020 (Бразилия, GOL); с 19 февраля 2021 г. - SCAT Airlines, Казахстан; в Европе в январе 2021 г. запрет снят на последние модификации, но полеты не выполняются.

Разбиение струи на более мелкие струйки (перекачка энергии шума в область ВЧ)
– шумоглушащие сопла (ШГС) и насадки – эффективность на НЧ до 10 дБ

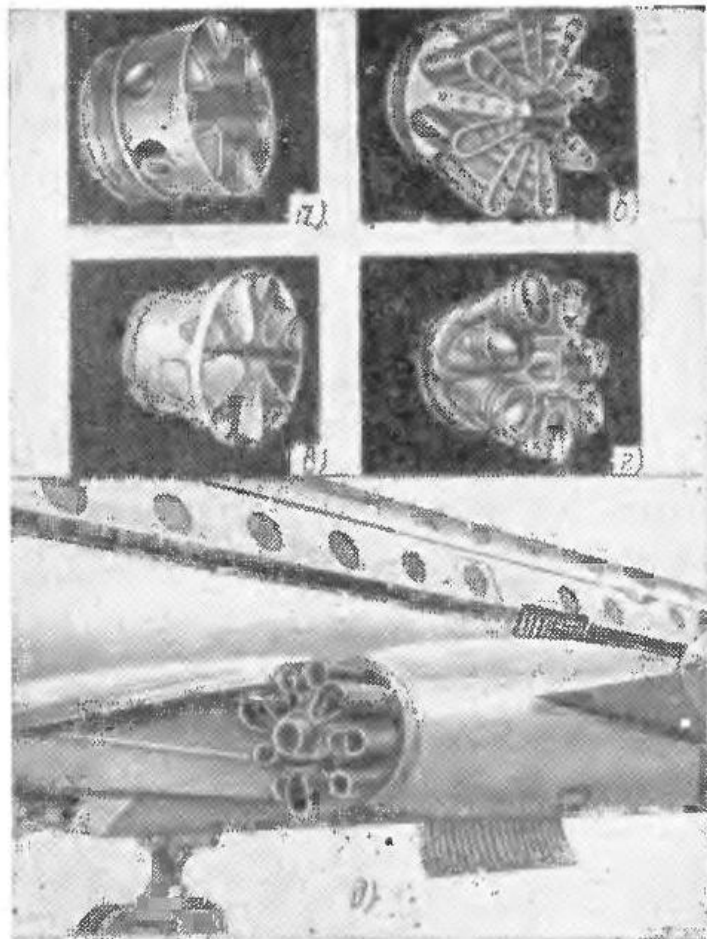
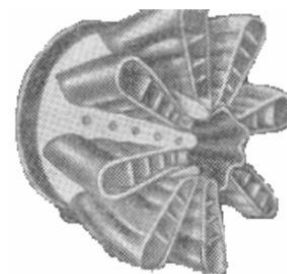


Рис. 5.9. Шумоглушащие сопла ТРД:
а—гофрированное; б—лепестковос; в—комбинированное с гофрами; г—комбинированное с трубами и центральным соплом с гофрами;
д—шумоглушащее сопло самолета Ту-104



Восьмилепестковое сопло

Уменьшение длины начальной участка струи, изменение структуры турбулентного перемешивания
- шевроны – эффективность до 4-5 дБ



Пилообразная и прямоугольная кромки сопла



Шевроны за соплом первого контура двигателя CFM-56 самолета А321 «Аэрофлота» (а/п Пулково)



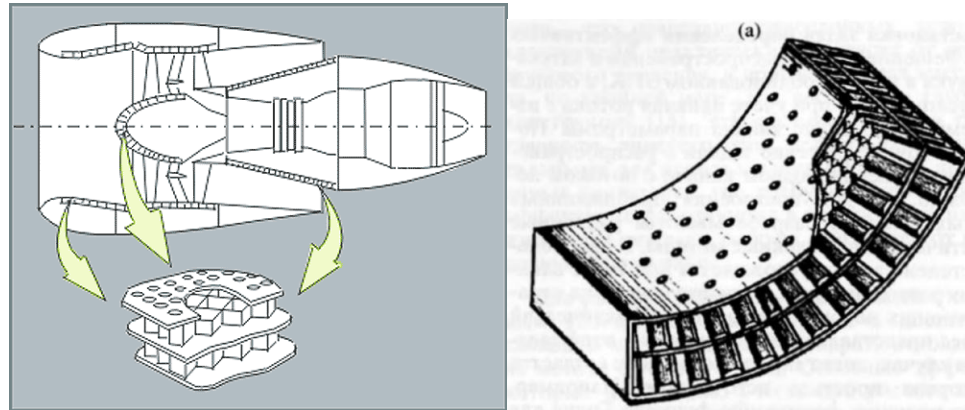
Шевроны на гондole второго контура самолета Boeing-787 'Dreamliner' (двигатель GEnx-1).

NB! Клиренс двигателя очень малый

Другие возможные пути уменьшения шума струи: «перевернутые» профили скорости, газовые экраны, аэроакустические взаимодействия.

Методы снижения шума турбореактивных двигателей, связанного не только со струей (шум вентилятора и компрессора)

Звукопоглощающие конструкции (ЗПК) – эффективность до 6-8 PN dB



ЗПК в разрезе



ЗПК в воздухозаборнике (Ту-154М, двигатель Д-30КУ)



Другие способы:

- отказ от ВНА (входного направляющего аппарата) – до 2-3 PN dB
- использование одноступенчатого вентилятора вместо 2-3- ступенчатого – до 3-8 PN dB
- применение низкооборотных вентиляторов (с редуктором) – до 10-15 PN dB
- применение широкохордных лопаток вентилятора (снижение окружных скоростей лопаток для снижения уровня шума, а также увеличение степень сжатия воздуха в вентиляторе при меньшем радиусе лопатки. Кроме того, широкие хорды уменьшают опасность возникновения вибраций, что позволяет отказаться от антивибрационных полок и, при использовании прочных и легких композитных материалов (углепластиков), облегчить лопатку; ещё одно достоинство широкохордных бесполочных лопаток: поток на входе в двигатель имеет меньше возмущений, это тоже приводит к снижению шума и повышает устойчивость работы двигателя при помпаже)
- применение бесшовных воздухозаборников
- улучшение аэродинамики спрямляющего аппарата (в т.ч. оптимизация числа рабочих и спрямляющих лопаток) – до 2-3 PN dB (использование взаимодействия «ротор – статор»)
- увеличение числа двигателей: $\Delta L = -\alpha \cdot \lg n$ PN dB, где n – число двигателей, $\alpha=5$ для статических условий, $\alpha=10$ для полёта
- применение скошенных воздухозаборников (для шума хорошо, но опасность помпажа на больших углах атаки)
- использование аэроакустических взаимодействий («звук – струя»)
- процедурные методы.

Кроме шума двигателей, актуально снижение шума планера (вызванного обтеканием самолета потоком).

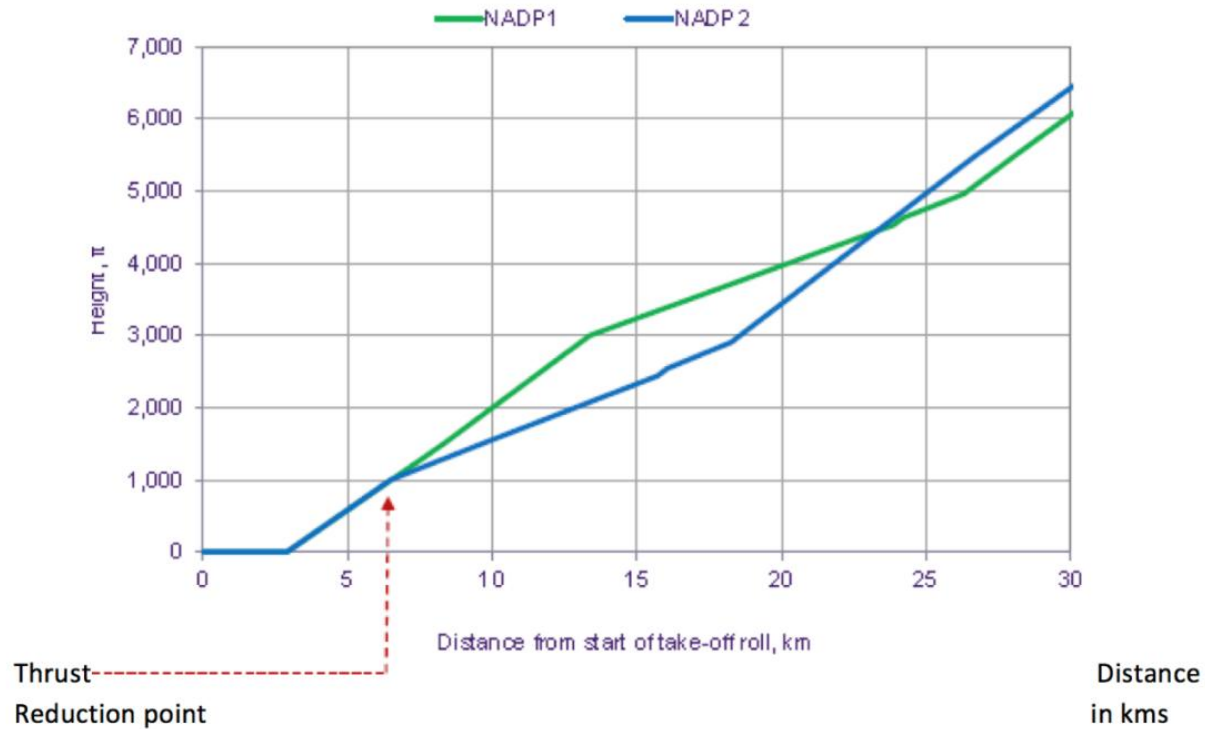
Процедурные методы снижения шума самолетов

- это специальные приемы пилотирования самолетов, позволяющие снизить шум на определенной территории вблизи аэропорта, применяются обычно на взлёте и в наборе высоты.

Существуют стандартные процедуры NADP1 и NADP2 (в зависимости от удаления территории, на которой требуется снизить шум, от аэропорта). Основные методы снижения шума – увеличение расстояния от источника шума (самолета) до территории и уменьшение акустической мощности источника. Первое достигается крутым набором высоты после взлета, второе – снижением режима работы двигателей (их дросселированием) при пролете над территорией, где надо снизить шум.

Применяемые в аэропорту процедуры снижения шума описаны в сборниках аэронавигационной информации по каждому аэропорту, текущие изменения вносятся в NOTAM.

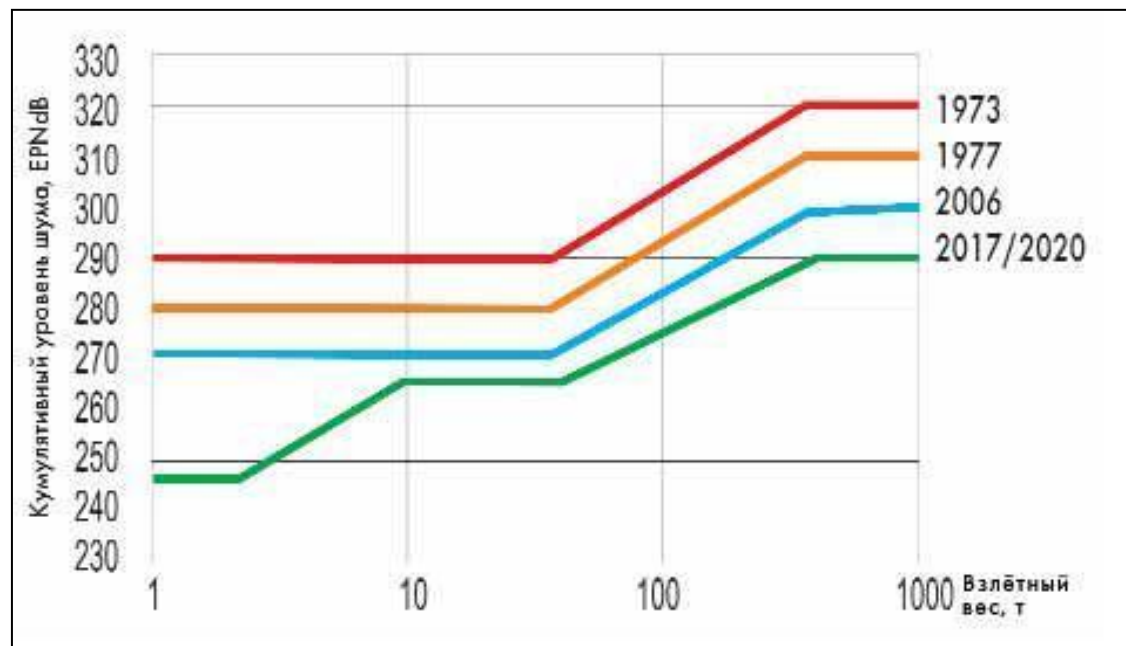
Height in feet



Ориентировочное сравнение траекторий «малозумного» набора высоты в соответствии с NADP1 и NADP2

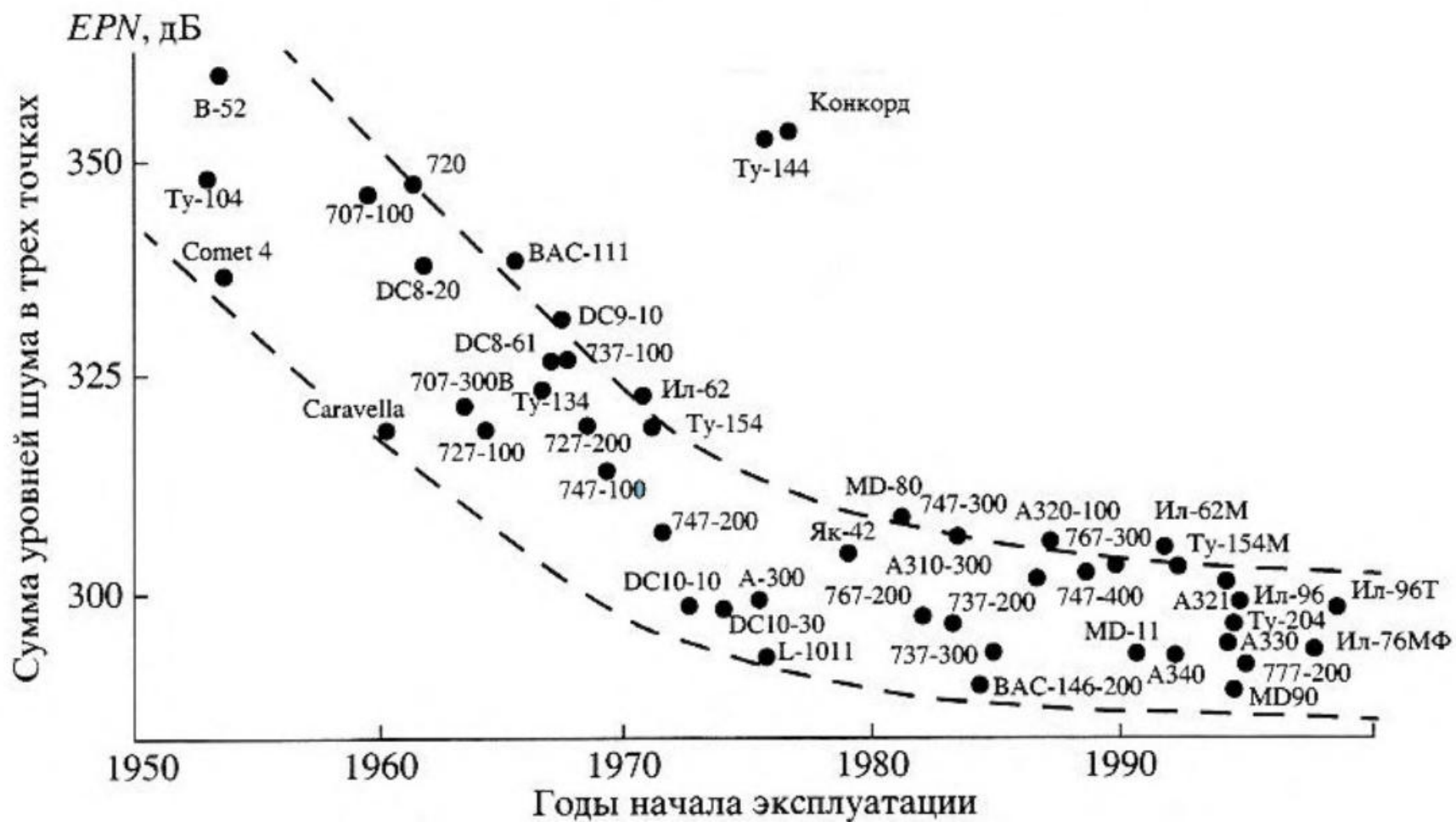
Снижение шума над населенными пунктами достигается также оптимизацией схем захода на посадку (STAR) и схем выхода (SID) из зоны аэродрома

Штрафы за превышение ограничений по шуму.



Ужесточение норм по шуму самолетов гражданской авиации
 (Приложение 16 к Чикагской конвенции гражданской авиации, ICAO)

Каждый новый тип самолета должен пройти сертификацию по шуму с соответствии с требованиями Приложения 16



Изменение уровня шума самолетов на протяжении последних десятилетий XX века

Литература

1. Авиационная акустика. Ч.1. Шум на местности дозвуковых пассажирских самолетов и вертолетов. – М.: Машиностроение, 1986.
2. Кравчун П.Н. Генерация и методы снижения шума и звуковой вибрации. – М.: Издательство Моск. ун-та, 1991.
3. Самохин В.Ф., Картовицкий Л.Л. Шум двигателей и самолетов. – М.: МАИ-принт, 2009.