

EMISSIONI DA TURBINE A GAS

1. Generalità

I problemi di inquinamento da turbine a gas aeronautiche si risentono specificamente in zone aeroportuali e nella stratosfera.

I principali agenti inquinanti sono:

- Fumo e particolato
- Monossido di Carbonio (CO)
- Idrocarburi incombusti (HC)
- Ossidi di Azoto (NO_x= NO, NO₂)
- Biossido di Zolfo (SO₂)

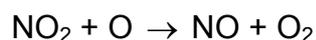
Vi sono inoltre prodotti della combustione non inquinanti in senso stretto come CO₂ ed H₂O che possono contribuire al cosiddetto “effetto serra” (riscaldamento terrestre).

Esistono in campo aeronautico regolamenti che impongono le massime emissioni ammesse in relazione ai tipi di motore ed ai cicli di funzionamento.

2. Effetti delle emissioni

Gli effetti degli inquinanti sono di differenti tipi:

- Fumo effetti sulla salute, come particolato riflette la radiazione solare.
- HC odori, effetti sulla salute.
- SO₂ , SO₃ tossici, corrosivi, piogge acide.
- CO tossico.
- NO_x effetti sulla salute, piogge acide, interagisce con lo strato di Ozono in atmosfera



Non sono ben chiari gli effetti quantitativi di questa reazione.

3. Meccanismi di formazione degli inquinanti

L'andamento tipico delle emissioni in funzione della potenza è riportata nella figura seguente.

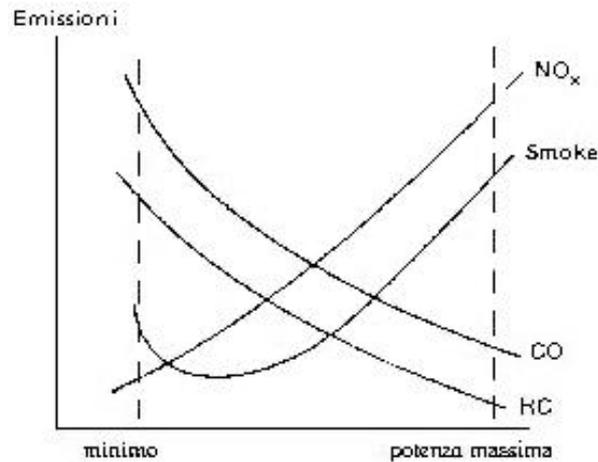


Fig. 3.1

Nel seguito si analizzano brevemente i meccanismi di formazione dei principali inquinanti.

3.1 Monossido di Carbonio

In genere si forma dove manca O_2 (miscela ricca), dove c'è scarso mescolamento o bassi tempi di residenza .

Si forma anche per dissociazione di CO_2 ad alta temperatura.

Quando CO si è formato ad esempio in zona primaria, fenomeni di quenching (ad esempio da aria di raffreddamento) ne impediscono la ulteriore riossidazione.

Le reazioni di rimozione del CO possono essere:



Le emissioni di CO sono controllate dalla cinetica più che dall' equilibrio.

3.2 Idrocarburi incombusti

Sono costituiti da combustibile che non reagisce o da prodotti di rottura delle molecole più grandi.

La loro formazione dipende da inadeguato mescolamento, fenomeni di quenching, cattiva atomizzazione, del combustibile, scarso tempo di residenza.

In genere diminuiscono all'aumentare della pressione e della temperatura (aumenta la velocità di reazione).

3.3 Ossidi di Azoto (NO_x)

Gli ossidi di Azoto si formano in zone ad alta temperatura (>1500 °C) con disponibilità di O₂.

Il processo di formazione è endotermico ed il composto predominante è NO che si può ossidare ad NO₂ (NO + NO₂ = NO_x).

Esistono tre meccanismi di formazione di NO:

- **NO termico** (prodotto nei gas di post fiamma da N₂ in aria)

La formazione avviene col meccanismo a catena:



In genere il massimo di formazione di NO termico si ha per miscele leggermente povere ($\Phi > 0.8$) in quanto in tali condizioni è disponibile O₂ e la temperatura è sufficientemente alta.

In genere la pressione ha scarso effetto sulla formazione di NO termico.

La formazione di NO termico aumenta col tempo di reazione (essendo la reazione non particolarmente veloce e non raggiungendosi l'equilibrio).

- **NO prompt** (prodotto dal fronte di fiamma da reazioni veloci)

A volte NO si forma molto presto nella regione di fiamma, specie con fiamme ricche.

Il meccanismo di formazione non è ben noto, sembra intervengano prodotti intermedi, radicali.

Si può ritenere che la concentrazione di NO formatosi per questa via negli attuali combustori sia al massimo dell'ordine di qualche decina di ppm (<50 ppm).

- **NO da combustibile** (prodotto dalla ossidazione di N₂ contenuto nel combustibile)
Questo NO si forma da N₂ legato nella molecola dal combustibile.
Il contributo di questo NO all' NO totale può essere notevole.

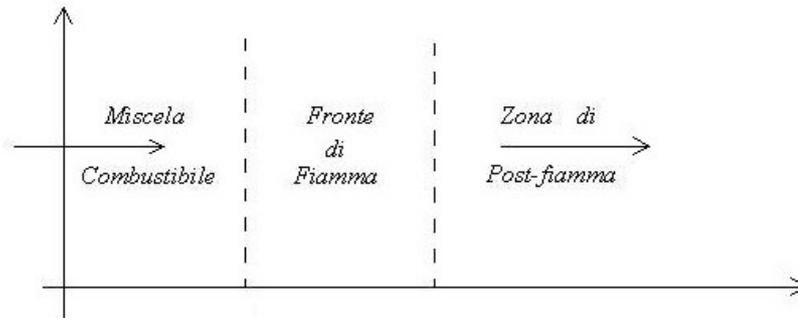


Fig. 3.2

3.4 Fumo

E' costituito da particolato in genere molto fine formato da particelle ad elevato rapporto C/H.

Si origina in zone di fiamma ricca o dove non c'è buon mescolamento (zone fredde, mancanza di O₂). Nei combustori in genere si forma al centro, in corrispondenza della zona più densa dello spray di combustibile (scarso O₂).

Parte del fumo (soot) formatosi qui viene poi bruciato nella zona a valle intermedia e/o di diluizione. Quello che non viene bruciato è scaricato.

La formazione del fumo è controllato più dal mescolamento e dalle caratteristiche dello spray che della cinetica.

In genere gli idrocarburi di tipo aromatico tendono a produrre più fumo di quelli alifatici. I processi di formazione sono differenti per i diversi idrocarburi e si possono ricondurre a reazioni di condensazione (aromatici) e frammentazione, polimerizzazione e nucleazione. Nel caso di combustori per turbogetti i parametri che maggiormente influenzano la produzione di fumo sono:

- Proprietà del combustibile (la viscosità ed altre proprietà possono influire sulle dimensioni delle gocce, inoltre aumentando il contenuto di H₂ diminuisce il fumo)
- Pressione e temperatura di combustione (aumentando p o la $T_{ingresso}$, aumenta anche il fumo; aumentando T il fumo diminuisce)
- Rapporto aria-combustibile ($\Phi < 1.3$ sia ha mescolamento e quindi niente fumo)
- Polverizzazione del combustibile (air-blast sono preferibili agli atomizzatori a pressione)
- Tipo di iniezione

3.5 Biossido di Zolfo (SO₂) ed SO₃

Praticamente quasi tutto lo Zolfo contenuto nel combustibile viene ossidato ad SO_x (SO₂ + SO₃, SO₂ >> SO₃) per cui anche le tecniche di controllo si riconducono ad eliminare per quanto possibile lo Zolfo dal combustibile.

3.6 Emissioni di NO₂

NO si ossida ad NO₂ a bassa temperatura. In genere questa ossidazione avviene quando i gas di scarico lasciano il motore ma NO₂ può anche parzialmente formarsi nel motore in zone a bassa temperatura con eccesso d'aria.

4. Metodi per la riduzione degli inquinanti

Nelle turbine a gas i fattori principali che controllano la formazione di inquinanti sono:

- Temperatura e rapporto di equivalenza della zona primaria
- Grado di omogeneità della zona primaria
- Tempo di residenza nella zona primaria
- Modalità di raffreddamento delle pareti
- Caratteristiche della zona intermedia (dal punto di vista della possibilità di ossidare o meno CO, HC, soot)

Vediamo come si opera per i singoli inquinanti:

4.1 Monossido di Carbonio (CO)

Bisogna tener presente che:

- CO si produce nella combustione per qualunque valore di Φ
- Quando Φ è basso (< 0.5 e cioè nel caso di miscele povere) le temperature sono troppo basse per permettere l'ossidazione di CO a CO₂
- Quando nella zona primaria $\Phi > 0.9$ CO ossida a CO₂ e si porta a condizioni d'equilibrio (valori di CO alti)

Le tecniche per ridurre CO sono le seguenti:

- Migliorare l'atomizzazione per ottenere maggiore omogeneità (ad esempio: air-blast atomizer)
- Avere in zona primaria $\Phi \cong 0.7$
- Aumentare il tempo di residenza nella zona primaria
- Riduzione dell'aria di raffreddamento specie in zona primaria
- Spillare aria dal compressore a carico parziale, in modo da aumentare Φ (e quindi T) in zona primaria
- Distribuzione opportuna del combustibile tra i vari iniettori, bloccandone alcuni in modo da incrementare le prestazioni degli altri (maggiore Δp , maggiore atomizzazione) in condizioni di carico parziale

In generale tutte queste tecniche hanno lo scopo di migliorare l'efficienza di combustione (particolarmente critica al minimo).

4.2 Idrocarburi incombusti (HC)

Seguono un comportamento analogo a CO.

4.3 Ossidi di Azoto (NO_x)

Il fattore di maggiore importanza per la formazione degli NO_x è la temperatura (oltre ai tempi di reazione ed alla disponibilità di O₂).

Temperatura e tempo di residenza nella zona primaria si possono ridurre aumentando il flusso di aria, ma questo incrementa CO ed HC.

Esiste in genere una relazione tra le emissioni di CO (ed HC) ed NO_x (fig. 4.1).

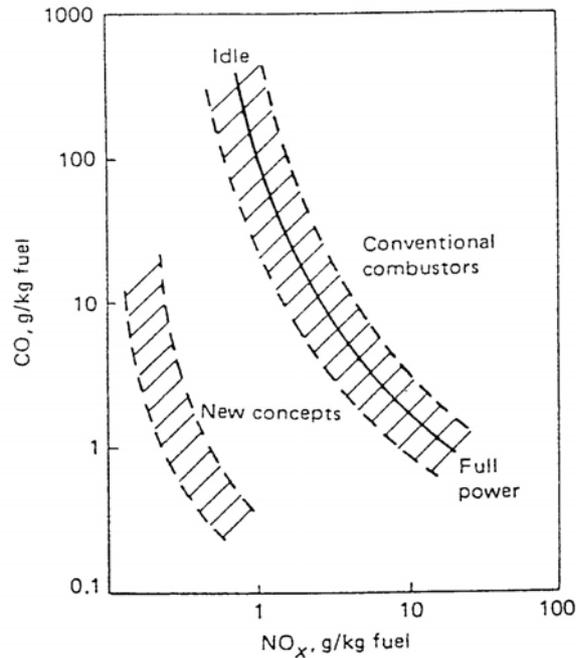


Fig. 4.1

Le tecniche che vengono in genere usate per la riduzione di NO_x sono le seguenti:

- Zona primaria magra in modo da ridurre la temperatura
Questo fa aumentare HC e CO per cui non si può smagrire oltre un certo limite (anche problemi di accendibilità)
- Zona primaria ricca in modo da diminuire temperatura e disponibilità di O_2 . Ci sono però problemi per la ossidazione di CO ed HC
- Aumento della omogeneità della miscela con migliore atomizzazione e mescolamento.
Si evitano zone più calde della media e si ottengono buoni risultati con miscele mediamente povere
- Riduzione dei tempi di residenza dei gas ad alta temperatura
- Iniezione di acqua in modo da ridurre la temperatura specie in zona primaria.
Portata di acqua da 0.5 a 2 volte quella del combustibile
Questa tecnica può produrre aumenti di CO ed HC, e quindi è più idonea per installazioni fisse
- Ricircolazione dei gas di scarico in modo da ridurre la temperatura con un inerte. Può far aumentare CO. Aumentano la complessità di impianto (problemi in campo aeronautico)

4.4 Fumo

La formazione di fumo (soot) è controllata più da parametri fisici (atomizzazione e zone di miscela ricca) più che dalla cinetica.

Si può iniettare più aria nella zona primaria ma questo aumenta in genere CO ed HC.

Si può anche introdurre acqua (come per NO_x) o additivi metallici (con Bario e Manganese ad esempio). Additivi che però possono produrre depositi sulle pale della turbina.

L'uso di air-blast aiuta a limitare il fumo (migliora l'atomizzazione).

5. Combustori a bassa emissione

Con modifiche ai combustori convenzionali si ottengono dei risultati di compromesso.

Per avere risultati più significativi è necessario passare a combustori appositamente concepiti.

In genere comunque per mantenere le emissioni di CO, HC ed NO_x entro limiti ragionevoli (limiti imposti) è necessario tenere la temperatura di combustione (in particolare nella zona primaria di combustione) tra i 1600 °K ed i 1750 °K circa in tutto il campo di utilizzo del motore.

Si analizzano nel seguito alcune tecniche impiegate e cioè:

□ **Combustori a geometria variabile**

Il concetto base di questi combustori è quello di cambiare la proporzione tra aria primaria ed aria secondaria e/o di diluizione al variare della portata del motore.

A massima potenza si ottimizza la quantità d'aria in zona primaria in modo da ridurre le emissioni di NO_x e fumo.

Quando si riduce la potenza si aumenta la proporzione dell'aria secondaria e/o di diluizione al fine di mantenere la zona primaria nella fascia di temperatura che minimizza le emissioni (diminuendo la potenza diminuisce in genere T_{finale} e quindi è necessario cambiare la proporzione dell'aria).

□ **Combustione in stadi**

In questo caso generalmente il combustibile viene iniettato in più stadi in modo da controllare la temperatura di combustione. Si ha in genere una zona primaria non spinta (temperature non elevate) seguite da una o più zone in cui vengono iniettati aria e combustibile.

In tal modo si riesce a ben controllare la temperatura.

□ **Combustione magra con prevaporizzazione**

In questo caso il combustibile viene vaporizzato e mescolato con l'aria prima della combustione in modo da ottenere una zona primaria magra ed omogenea.

E' un sistema da usare preferibilmente con la geometria variabile.

Ci possono essere problemi in relazione alla stabilità della fiamma (miscela povera, blow out) autoignizione durante vaporizzazione etc....

□ **Combustione catalitica**

Mediante l'uso di un catalizzatore si può ottenere l'ossidazione del combustibile a temperature 1000 °K inferiori a quelle convenzionali e quindi ben oltre i limiti di infiammabilità per miscela povera. In questo modo le emissioni di NO_x si possono ridurre in modo drastico.

A valle della sezione catalitica del combustore si può predisporre una sezione termica per completare le reazioni, che apporta un salto termico dell'ordine del 20% del totale.

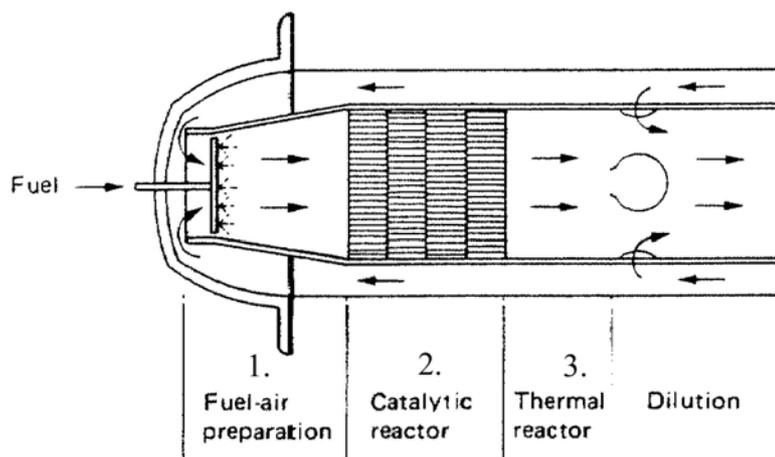


Fig 5.1

Vi possono essere problemi di autoignizione della miscela in zona 1.(fig. 5.1), inoltre il catalizzatore deve essere riscaldato per essere attivo e quindi vi possono essere problemi per partenze a freddo.

6. Sviluppo di combustori a bassa emissione

□ Grandi motori

Due tipi di combustori di nuova concezione sviluppati per il contenimento delle emissioni nel caso di grandi motori sono indicati nelle seguenti figure.

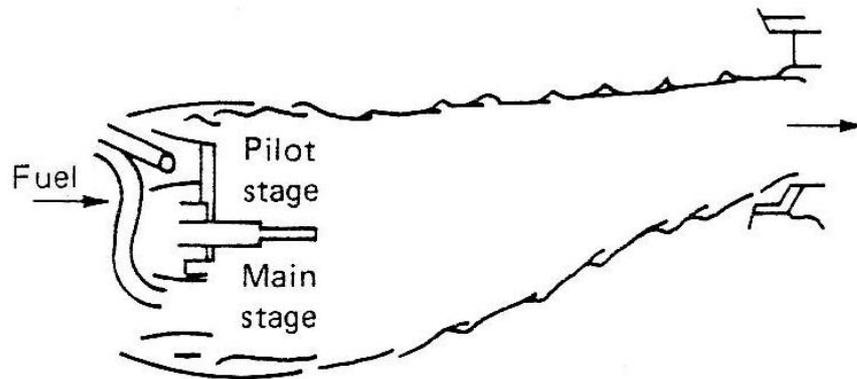


Fig. 6.1

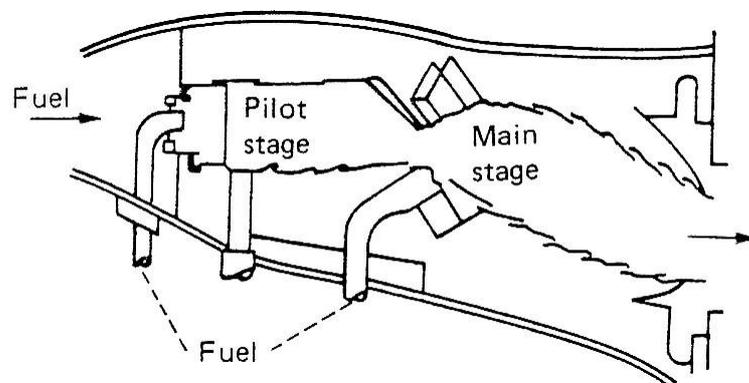


Fig. 6.2

In ambedue i casi vi sono due stadi di combustione, atomizzatori air blast, combustione povera e premiscelamento aria-combustibile.

Gli stadi pilota sono ottimizzati per ottenere elevata efficienza di combustione e basse emissioni di CO ed HC al minimo, mentre lo stadio principale è ottimizzato per combustione magra e basse emissioni di NO_x e fumi al massimo della potenza.

□ Piccoli motori

Sono stati sviluppati anche diversi combustori per piccoli motori alcuni con concetti analoghi a quelli precedenti (fig. 6.2).

Un tipo è quello riportato in fig. 6.3, con combustione a due stadi e con premiscelazione (in tubi) del combustibile inviato nello stadio principale.

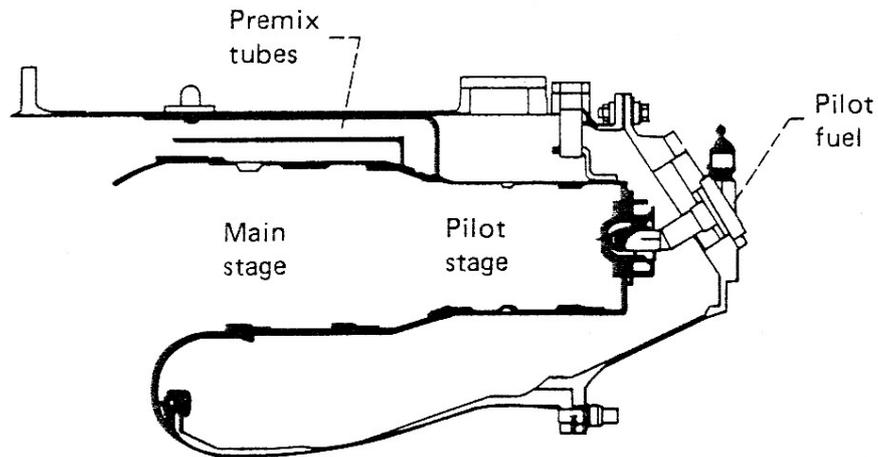


Fig. 6.3

Nel combustore a due stadi di fig. 6.4 si vaporizza il combustibile inviato nello stadio principale

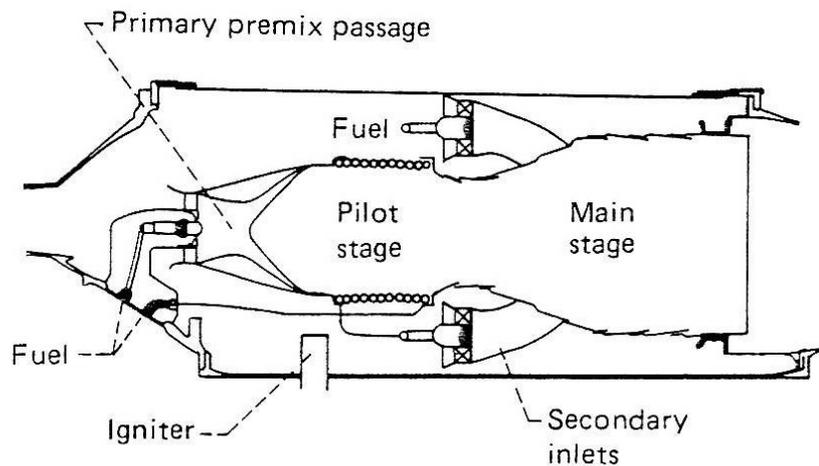


Fig. 6.4

RUMORE NEI TURBOGETTI

1. Introduzione

Il problema del rumore con l'introduzione dei turbogetti è diventato, specie nelle aree aeroportuali, assillante e tale da bloccare anche alcuni progetti di sviluppo di nuovi tipi di aeromobile.

Questo ha portato da una parte alla emissione di regolamenti di controllo del rumore e dall'altra allo studio di tecniche e di configurazioni atte a ridurre il rumore stesso.

Per quanto riguarda il rumore esso viene in genere misurato all'atterraggio, durante il rullaggio per il decollo e subito dopo il decollo al fine di avere un quadro rappresentativo.

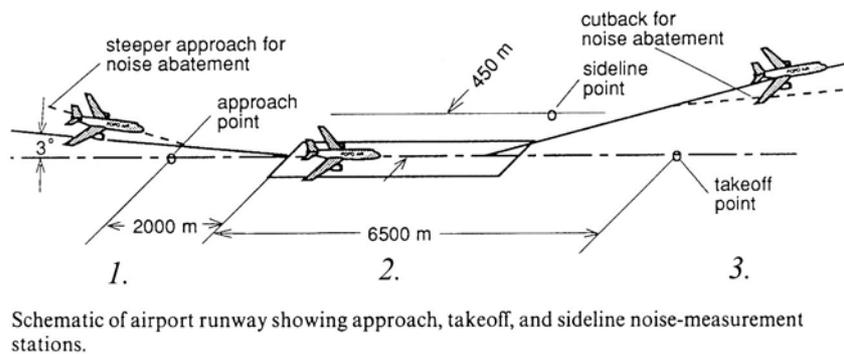


Fig. 1.1

1. misura all'atterraggio
2. misura al rullaggio per decollo
3. misura sul cammino di decollo

Esiste in generale una sostanziale differenza tra il rumore di propulsori per aerei subsonici e supersonici.

Nel caso di aereo subsonico tipo turbofan ad elevato BPR il problema critico è rappresentato dal rumore del fan (al decollo e all'atterraggio), in quanto la velocità dei getti primari e secondari sono abbastanza ridotte.

Se si considera un propulsore per aereo supersonico, questo ha in genere al decollo un getto con velocità elevata con conseguente elevato rumore, difficilmente

controllabile con una configurazione a ciclo fisso (questo porta ad uno sviluppo dei motori a ciclo variabile).

2. Sorgenti del rumore

Il rumore proviene da non stazionarietà del flusso. In un turbogetto vi sono fondamentalmente tre sorgenti di non stazionarietà:

- Movimento delle palettature rispetto all'osservatore
- Movimento di una palettatura rispetto ad un'altra
- Turbolenza del fluido ad alta instabilità

Lo studio può essere condotto facendo riferimento alle equazioni fondamentali (conservazione della massa e del momento della quantità di moto) della fluidodinamica.

$$\begin{cases} \frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla u = 0 \\ \rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p \end{cases} \quad (1a;1b)$$

$\frac{D}{Dt}$ = derivata materiale

introducendo le ipotesi di fluido non viscoso ed a conducibilità termica nulla:

$$\frac{Ds}{Dt} = 0$$

Linearizzando per una generica grandezza : $\phi = \phi_0 + \phi'$ dove ϕ_0 rappresenta il valore di riferimento, costante nello spazio e nel tempo e ϕ' la perturbazione rispetto tale valore, trascurando i termini di ordine superiore al primo otteniamo:

$$\begin{cases} \frac{D\rho'}{Dt} + \rho_0 \nabla u' = 0 \\ \rho_0 \frac{Du'}{Dt} = -\nabla p' \end{cases} \quad (2a;2b)$$

e

$$\frac{Ds'}{Dt} = 0$$

dove $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_0 \cdot \nabla$.

Per una trasformazione termodinamica nel caso dei gas perfetti:

$$s - s_0 = C_p \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \frac{p}{p_0}$$

linearizzando e ricordando che $R = C_p - C_v$:

$$s' = C_p \frac{T'}{T_0} - R \frac{p'}{p_0} = C_v \frac{p'}{p_0} - C_p \frac{\rho'}{\rho_0}$$

Differenziando:

$$\frac{Ds'}{Dt} = 0 = \frac{C_v}{p_0} \frac{Dp'}{Dt} - \frac{C_p}{\rho_0} \frac{D\rho'}{Dt}$$

$$\frac{D\rho'}{Dt} = \frac{\rho_0}{\gamma p_0} \frac{Dp'}{Dt}$$

sostituendo quest' ultima in 2a ed applicando l' operatore $\nabla \cdot$ alla 2b e $\frac{D}{Dt}$ alla 2a si

ottiene:

$$\frac{\rho_0}{\gamma p_0} \frac{D^2 p'}{Dt^2} - \nabla^2 p' = 0$$

che è l' equazione delle onde rispetto p' dove $a_0 = \sqrt{\gamma p_0 / \rho_0}$ è la velocità del suono.

Senza perdita di generalità possiamo considerare il caso in cui $u_0 = 0$

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - a_0^2 \nabla^2 p' = 0$$

e nel caso monodimensionale si ha:

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = a_0^2 \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2}$$

Che è soddisfatta da ogni funzione del tipo:

$$p' = p'(x \pm a_0 t)$$

Quindi p' è costante lungo $x = \pm a_0 t$ (curve caratteristiche). Cioè p' al punto x ritorna uguale al valore che aveva per $x = 0$ dopo un tempo t che corrisponde a quello necessario al propagarsi della perturbazione da $x = 0$ al punto considerato, essendo a_0 la velocità di propagazione della piccola perturbazione.

Per vedere come vanno effettivamente le cose bisogna considerare le condizioni al contorno.

Si consideri ad esempio un piano (fig. 2.1) che si muove perpendicolarmente all'asse x secondo la relazione: $x = A \sin \omega t$

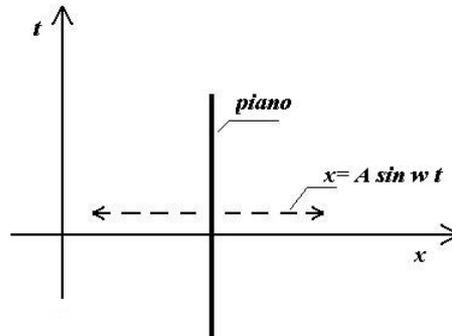


Fig. 2.1

per cui:

$$\dot{x} = A\omega \cos \omega t$$

Si assuma una soluzione dell'equazione delle onde del tipo:

$$p' = P \cos[k(x - a_0 t)]$$

Dall'equazione del momento:

$$\rho_0 \frac{\partial u'}{\partial t} + \frac{\partial p'}{\partial x} = 0$$

si ottiene:

$$\frac{\partial u'}{\partial t} = \frac{p k}{\rho_0} \sin[k(x - a_0 t)]$$

che per integrazione fornisce:

$$u' = \frac{p}{\rho a_0} \cos[k(x - a_0 t)]$$

da cui, essendo $\dot{x} = u' = A\omega \cos \omega t$ si ha:

$$\begin{cases} \frac{P}{\rho_0 a_0} = A \omega \\ -k a_0 = \omega \end{cases}$$

L'energia trasferita da quest' onda attraverso un piano, per unità di area e per ciclo, è data da:

$$E = \int_0^{2\pi/\omega} p' u' dt = \int_0^{2\pi/k a_0} \frac{P^2}{\rho_0 a_0} \cos^2 [k(x - a_0 t)] dt = \left(\frac{P^2}{\rho_0 a_0} \right) \left(\frac{\pi}{k a_0} \right)$$

La potenza per unità di area \overline{W} è data da:

$$\overline{W} = \frac{E}{\Delta t} = \frac{E}{\left(2\pi/k a_0 \right)} = \left(\frac{P^2}{\rho_0 a_0} \right) \left(\frac{\pi}{k a_0} \right) \frac{k a_0}{2\pi} = \frac{P^2}{2\rho_0 a_0}$$

si osservi che $\frac{P^2}{2}$ è il valore quadratico medio della fluttuazione di pressione e \overline{W} può essere considerata la potenza sonora per unità di area.

Un discorso analogo si può fare per una sorgente puntiforme che emana un' onda sferica.

L'equazione delle onde diventa:

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = a_0 \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \frac{\partial p'}{\partial r} \right]$$

mentre:

$$p' = \frac{P r_0}{r} \cos[k(r - a_0 t)]$$

La potenza sonora per unità di superficie diventa:

$$\bar{W} = \frac{P^2}{2\rho_0 a_0} \left(\frac{r_0}{r} \right)^2$$

\bar{W} quindi decade come $\frac{1}{r^2}$.

La percezione sonora dell'orecchio umano è proporzionale al logaritmo della fluttuazione di pressione per cui sia la pressione sonora che la potenza sonora W ($W = \bar{W}$ per superficie) sono espresse in decibel dB.

$$\text{Livello di pressione sonora } dB = 20 \log_{10} \left(\frac{p'}{2 \cdot 10^{-5}} \right) \quad \left(p' = N/m^2 \right)$$

$$\text{Livello di potenza sonora } dB = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{10^{-12}} \right) \quad (P = \text{Watt})$$

(Per esempio: $1 N/m^2 = 94 dB$; $1.015 \cdot 10^5 N/m^2 = 1 atm = 194.1 dB$)

Si può considerare che le fluttuazioni di pressione p' siano provocate da una sfera di raggio r_0 che pulsa armonicamente, con ampiezza di fluttuazioni di pressione pari a P

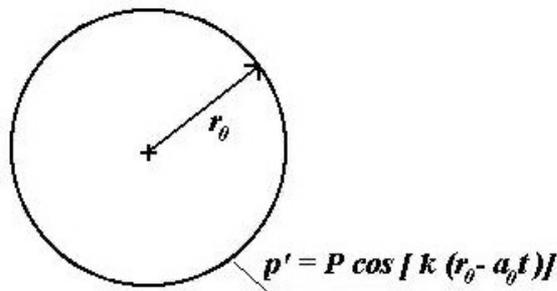


Fig. 2.2

Quando $r_0 \rightarrow 0$ con $P r_0 = \text{cost}$ si ottiene una sorgente puntiforme, o monopolo, con potenza acustica W_m data da:

$$W_m = \frac{2\pi(P r_0)^2}{\rho_0 a_0}$$

Il monopolo è una soluzione fondamentale dell'equazione delle onde e da essa ne possono essere ottenute altre per sovrapposizione, come ad esempio il dipolo ed il quadrupolo.

Il dipolo (fig.2.3) è composto da due monopoli di segno opposto separati da una distanza d

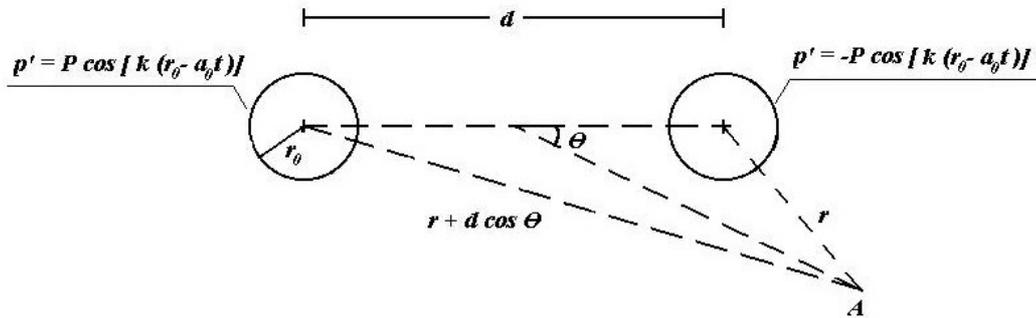


Fig. 2.3

In un punto A distante dai due centri r ed $r + d \cos \theta$ giungono, a distanza di tempo $\frac{d \cos \theta}{a_0}$, le vibrazioni emesse dai due monopoli.

Procedendo come nel caso del monopolo e con opportune ipotesi (es. $kr \gg 1$), si ottiene che la potenza irradiata dal dipolo (potenza acustica) è data da:

$$W_d = \frac{2 \pi (P r_0)^2}{\rho_0 a_0} (k d \cos \theta)^2$$

La potenza del dipolo è $(k d \cos \theta)^2$, quella del monopolo:

Il fattore $kd = \frac{2 \pi d}{\lambda}$ (rapporto tra la distanza dei monopoli rispetto alla lunghezza d'onda) è direttamente proporzionale alla frequenza del suono irradiato (essendo λ la lunghezza d'onda del suono irradiato).

Si vede quindi che la potenza acustica si abbassa diminuendo la frequenza.

Combinando due dipoli si ottiene un quadripolo che irraggia una potenza acustica data da:

$$W_q = \frac{2 \pi (P r_0)^2}{\rho_0 a_0} (k d)^4$$

Il monopolo può essere assimilato ad un getto non stazionario.

Il dipolo può essere assimilato ad una pala vibrante.

Il quadripolo può essere assimilato alla turbolenza (fluttuazioni di pressione turbolenta).

3. Rumore dei getti

Quando un getto penetra in un ambiente in quiete o in movimento, si generano dei fenomeni di mescolamento che portano a delle fluttuazioni di pressione .

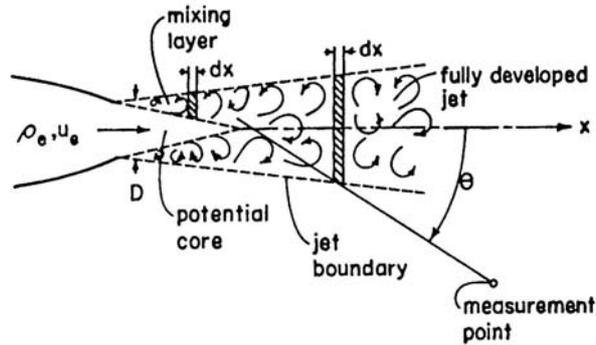


Fig. 3.1

Conviene distinguere il caso dei getti subsonici da quello dei getti supersonici

3.1 Getti subsonici

Le fluttuazioni di pressione e quindi la potenza acustica che si propaga in questo caso può essere considerata come prodotta da una distribuzione di quadripoli.

Il diametro del getto D fornisce la scala della turbolenza ed è assimilabile ad r_0 , mentre l'entità della fluttuazione di pressione è proporzionale a $\rho_e u_e^2$ per cui si ha:

$$(P r_0)^2 \cong (\rho_e u_e^2 D)^2$$

Si ha inoltre:

$$u \cong \frac{u_e}{D}$$

Per cui:

$$kd \cong \frac{u_e}{a_0} \quad \left(k = \frac{u}{a_0} \right)$$

La potenza acustica del getto W_g è quindi data da (tenendo conto dell'espressione di

$W_q = W_{quadrupolo}$):

$$W_g \cong \frac{2\pi \rho_0 u_e^8 D^2}{a_0} \quad \rho_0 \cong \rho_e$$

Si può vedere che la potenza acustica dipende da u_e^8 .

Questa espressione può essere scritta come:

$$W_g \cong D^2 (\rho_e u_e^3) \frac{\rho_e}{\rho_0} \left(\frac{u_e}{a_0} \right)^5$$

Poiché $D^2 (\rho_e u_e^3)$ è la potenza cinetica del getto, si può dire che l'efficienza acustica del getto η_{ag} è data da:

$$\eta_{ag} \cong \frac{P.acustica}{P.cinetica} \cong \left(\frac{\rho_e}{\rho_0} \right) M_{e0}^5$$

$M_{e0} = \left(\frac{u_e}{a_0} \right)$ = numero di Mach riferito alla velocità del suono in aria ambiente.

Il rumore del getto ha caratteristiche direzionali, il massimo essendo circa a 45° rispetto alla direzione del getto:

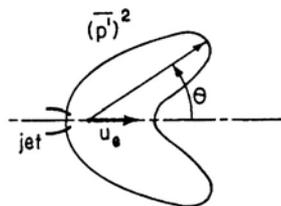


Fig. 3.2

θ assume come valore massimo $\cong 45^\circ$.

Motivi:

- Convezione dei quadripoli
- Rifrazione del suono quando abbandona il getto

Le caratteristiche in frequenza del getto dipendono dal fatto che ogni porzione del getto è caratterizzata da una dimensione d dello strato di mescolamento e da una velocità locale u per cui:

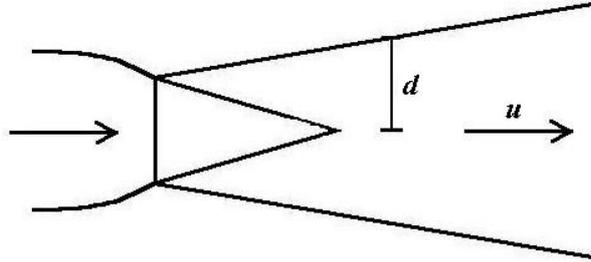


Fig. 3.3

$$\omega = \frac{u}{d}$$

3.2 Getti supersonici

Nel caso di getti supersonici (quando $M_{eo} > 2$) la situazione è diversa da quanto visto (anche perché l'efficienza acustica η_{ag} non può essere > 1).

In pratica, si vede sperimentalmente che la potenza acustica varia come u_e^3 (non come u_e^8).

In questo caso esistono meccanismi di produzione del rumore che non si hanno nei getti subsonici.

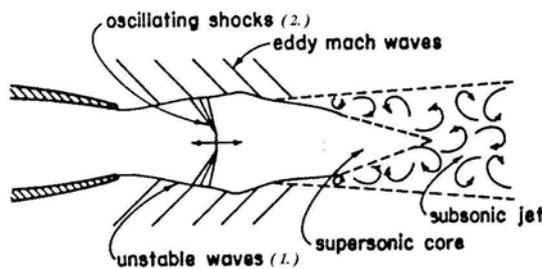


Fig. 3.4

Come si evince in fig. 3.4, lo strato di mescolamento supersonico 1. è instabile e dà origine ad onde di Mach che irradiano potenza acustica.

Si hanno inoltre onde d'urto oscillanti 2. (che si formano per riflessione sui confini del getto che sono instabili), quando il getto non è completamente espanso.

Per questo effetto si può avere un incremento di rumore di $3 \div 5 \text{ dB}$.

In conclusione W_g è proporzionale a u_e^3 .

3.3 Controllo del rumore prodotto dai getti

Diverse tecniche possono essere impiegate per controllare il rumore dei getti.

A parità di potenza acustica totale una è quella di aumentare la frequenza, in quanto l'orecchio umano è meno sensibile alle alte frequenze.

Poiché $\omega \cong \frac{u_e}{D}$, questo può essere fatto riducendo il diametro degli ugelli (più ugelli di piccolo diametro piuttosto che uno di grande diametro).

Si può anche cercare di ridurre la velocità ($W \div u_e^8$ oppure u_e^3) incrementando il trascinamento di aria esterna (ad esempio con diversi piccoli ugelli che sostituiscono uno grande).

Un notevole miglioramento si è avuto con i turbofan, che aumentando la portata, riducono in genere in modo consistente la velocità.

Quando si considerano le tecniche di riduzione rumore bisogna anche tenere presenti gli effetti sulla spinta, sul peso, sui consumi specifici, etc...

In molti casi la riduzione di 1 dB si paga con una riduzione della spinta dell'ordine di dell'1%.

4. Rumore nelle turbomacchine

Il rumore è prodotto da fluttuazioni di pressione dipendenti dal tempo, con comportamento che può ritenersi simile a quello dei dipoli.

Analogamente a quanto visto per i getti si può ottenere:

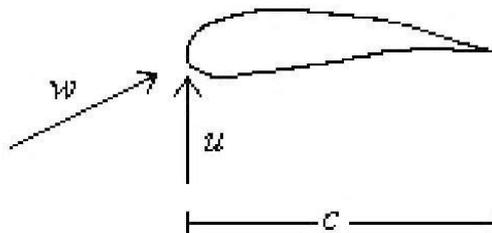


Fig. 4.1

$$W_{pala} \cong \rho u^6 \frac{c^2}{a^3} \cong \rho W^3 c^2 M_t^3$$

Essendo c la corda della paletta ed $M_t = \frac{u}{a} = M_{\text{tangenziale}}$

L'efficienza acustica della pala η_{pala} è data da:

$$\eta_{pala} \cong M_t$$

essendo la potenza scambiata tra pala e fluido dell'ordine di $\rho W^3 c^2 M_t^2$.

Il rumore prodotto dalla pala non propaga direttamente all'esterno, ma giunge all'osservatore propagandosi attraverso il motore e giungendo quindi allo scarico e/o al diffusore.

E' quindi importante esaminare il fenomeno della propagazione in un condotto.

Il problema fondamentale è quello di vedere se una fluttuazione di pressione generata in un condotto si propaga o viene attenuata.

Si può considerare ad esempio il caso di un rotore e quindi della propagazione in un condotto anulare (fig. 4.2):

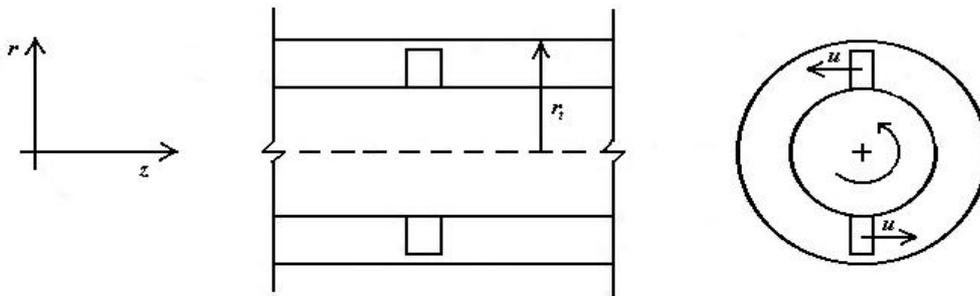


Fig. 4.2

Si considera che il flusso abbia, nell'anello, un numero di Mach M mentre il numero di Mach tangenziale al vertice della pala è dato da M_t (dove $M_t = \frac{u}{a_0}$).

Lo studio può essere effettuato utilizzando l'equazione delle onde.

Una condizione di attenuazione (o cut-off) della propagazione può essere ottenuta in funzione dei numeri di Mach M ed M_t .

Con buona approssimazione si può vedere che, nel caso di rotori con numero di pale elevato (> 10), per la propagazione deve essere:

$$M_t^2 + M^2 > 1$$

Quando questo non si verifica si ha cut-off.

Come si può vedere, per la propagazione il numero di Mach tangenziale deve essere maggiore di 1.

Si vede però che anche macchine a bassa velocità di rotazione (con velocità alla punta della pala subsonica) producono notevole rumore. Questo in generale è determinato da interazione tra statore e rotore.

Tale interazione produce infatti un campo di pressione rotante con velocità maggiore di quella del rotore di un fattore $\frac{B}{V-B}$ essendo B il numero delle pale del rotore e V il

numero delle pale dello statore. Se V e B sono vicini il fattore può essere elevato.

Nei moderni turbofan $V > 2B$, per cui non si hanno ulteriori frequenze di eccitazione, oltre a quella del rotore.

Inoltre non si hanno palettature di guida all'ingresso per evitare interazione tra scia e rotore.

Si lasciano inoltre ampi spazi tra il rotore e lo statore che lo segue, al fine di permettere il decadimento della scia del rotore.

Si osserva inoltre che le frequenze che si generano a causa del movimento del rotore non sono solo quella fondamentale (frequenza di passaggio delle pale) con le relative armoniche superiori; si notano infatti anche frequenze del tutto casuali inferiori e superiori a quella fondamentale.

Questo può essere imputato a due fatti:

- Le pale non sono tutte identiche
- Instabilità della scia a valle del rotore che può dare origine a fluttuazioni di frequenze inferiori alla fondamentale

Nelle figure seguenti vengono riportati gli andamenti delle suddette frequenze nel caso subsonico e supersonico

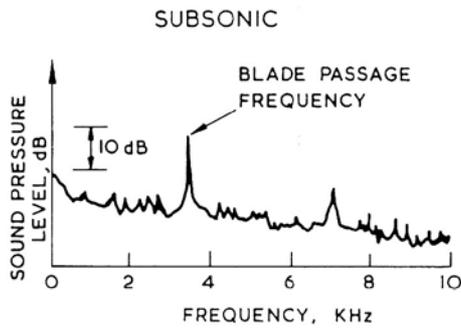


Fig. 4.3

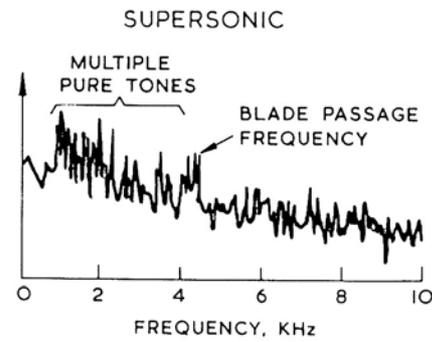


Fig. 4.4

5. Controllo del rumore in un condotto

Se le pareti del condotto sono rigide esse non sono in grado di estrarre energia dal campo sonoro.

Ma se le pareti permettono fluttuazioni radiali della velocità si possono ottenere delle attenuazioni in quanto è possibile estrarre lavoro.

Questo può essere ottenuto mettendo in contatto il condotto con piccole cavità (risonatori di Helmholtz) tramite una parete porosa.

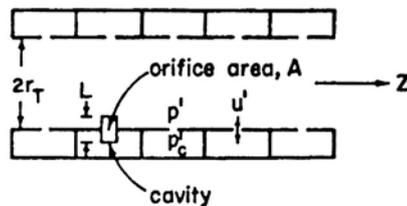


Fig. 5.1

Quando si hanno fluttuazioni di pressione esternamente, anche il fluido nella cavità oscilla.

A causa della resistenza viscosa si ha una dissipazione di energia e quindi una attenuazione dell'energia che propaga.

L'attenuazione dipende dalle frequenze caratteristiche della cavità, delle frequenze delle oscillazioni di pressione, etc...

Questi sistemi vengono in molti casi realizzati tramite strutture a nido d'ape ricoperte da una lamina perforata.

Notevoli progressi sono stati fatti nella messa in opera di tecniche di riduzione del rumore.

Un esempio è riportato nella figura 5.2.

Nei condotti sono installate superfici assorbenti che sono in grado di ridurre in modo consistente il rumore (riduzione dell'ordine di 5 dB nel rumore d'ingresso e di 8 dB nel rumore di picco posteriore).

I rivestimenti sono fatti in genere da strutture a nido d'ape ricoperte da una superficie porosa.

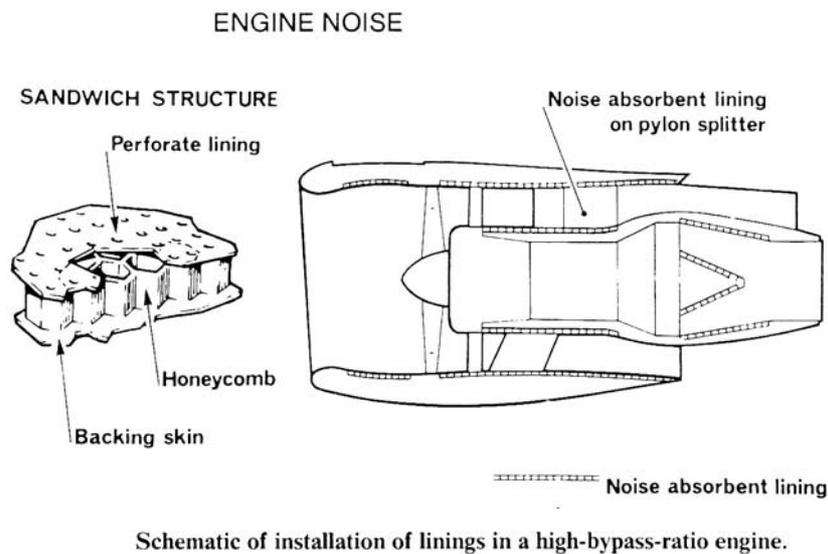


Fig. 5.2