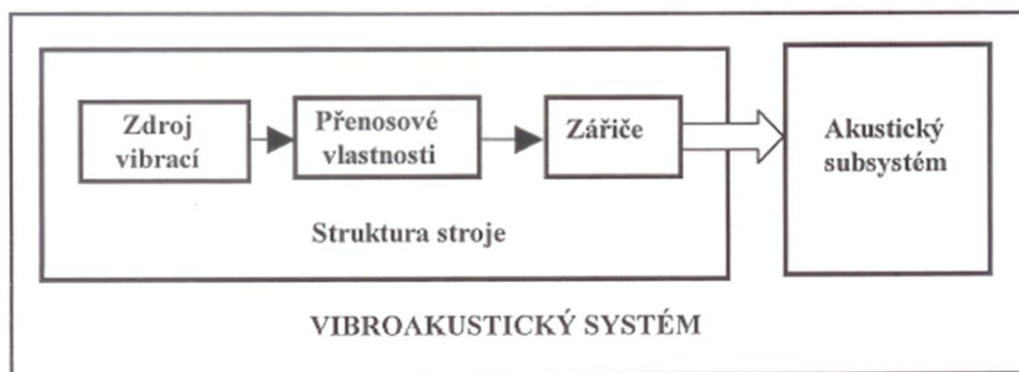


Snižování vibrací a hluku

V moderní společnosti se hluk stal důležitým měřítkem spolehlivosti a kvality. Každý z nás si automaticky vybírá byt nebo rodinný dům v klidném a příjemném prostředí. Tichá myčka nádobí, lednice či pračka v nás vytváří pocit vyšší jakosti. Návštěvu přírody vnímáme jako odpočinek a regeneraci psychických sil. Na druhé straně zvýšený hluk je příčinou únavy, stresu a civilizačních nemocí. Člověk dlouhodobě vystavený nadměrnému hluku je apatický nebo podrážděný, necítí se dobře a vykazuje i horší pracovní výsledky. Zvýšený hluk při jízdě v automobilu bývá předzvěstí návštěvy autoservisu. Nejčastěji se zabýváme snižováním hluku z pozemní dopravy, z průmyslových objektů a areálů, při instalaci nových technologických celků (vzduchotechnické a chladicí systémy) aj. Navrhujeme vhodné umístění, dílčí konstrukční úpravy, stavební úpravy, optimalizaci dělicích konstrukcí nebo protihlukové clony. Snižování hluku není výsledkem štěstí či náhody, ale odborného odstranění příčin a následků.

Vedle hluku je také nepříznivý výskyt vibrací všude kolem nás a to pak zejména na místech, kde se nejčastěji vyskytujeme a s vibracemi potkáváme, jako jsou pracovní prostory.

Cílem snižování vibrací je omezení vibrací na pracovních místech na zdravotně bezpečnou hodnotu. Vždy se jedná o systémové řešení, které zahrnuje zdroj vibrací, přenosovou cestu i samotného pracovníka. Pozitivní zdravotní účinky snížené expozice vibracím se objektivně projeví až po delší době.



Obr.1 Vznik a šíření vibrací a hluku strojních zařízení [1]

Podle zásahu do jednotlivých bloků se metody snižování vibrací a hluku dělí na:

- **Primární** (aktivní metody)
 - snížení budících silových účinků
 - zlepšení přenosových vlastností struktury strojů (frekvenční ladění)
 - upravují se zářiče hluku (povrchy strojů)

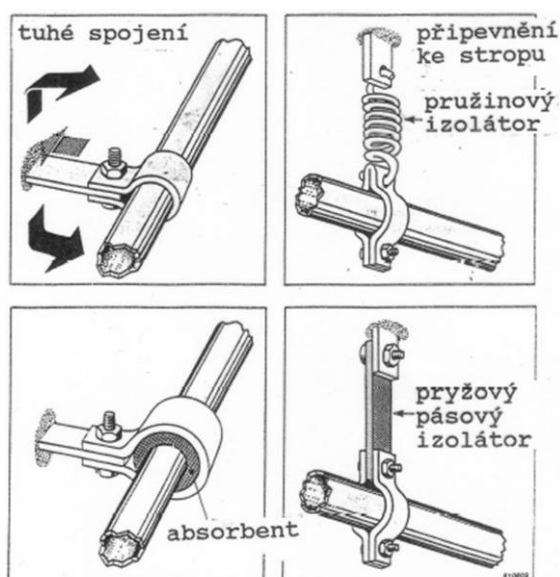
Co se týká ochrany člověka před hlukem a vibracemi, tak základem je vyloučení nebo podstatné omezení emise vibrací (hluku) přímo na zdroji. Nákup strojního zařízení či ručního nářadí s nižší deklarovanou hodnotou vibrací (hluku) je hlavním předpokladem nízké expozice obsluhy, což můžeme zařadit do aktivních metod.

- **Sekundární** (pasivní metody)
 - vibrační a hlukové izolace zdrojů hluku
 - vhodné prostorové rozmístění hlučných strojů v daném prostoru
 - haly se stěnami s vysoce pohltivými materiály
 - využíváním osobních ochranných prostředků (sluchové chrániče, přilby, antivibrační rukavice, obuv,..)

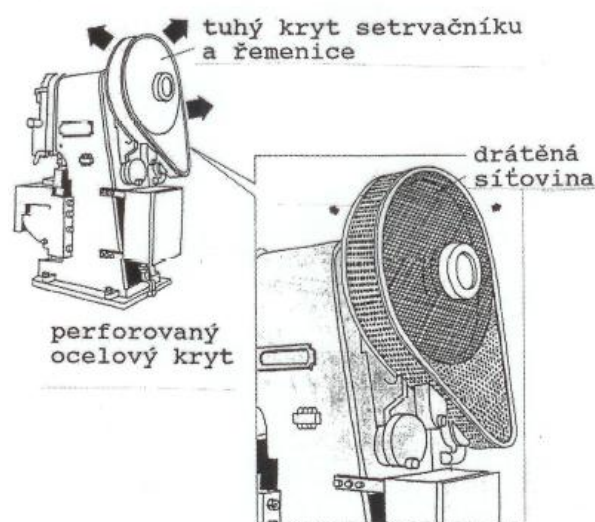
Originální opatření na snížení vibrací (protihlukové kryty zařízení) a další cílená opatření na zdrojích vibrací (hluku) jsou zpravidla nejúčinnější. V souhrnu všech dopadů na pracovní prostředí jsou

vynaložené prostředky neefektivněji využity, neboť taková opatření nesnižují produktivitu práce. Dalším opatřením na omezení hluku (vibrací) je:

- Cílené omezení cest šíření hluku (vibrací). Tato opatření vycházejí z podrobné akustické studie daného prostředí. V souhrnu zahrnují pružné ukládání strojů, krytování agregátů, zřízení protihlukových zástěn aj. Tato opatření omezí vyzařování hluku, šíření zvuku konstrukcí a následné vyzaření hluku do chráněného pracovního prostoru.
- Zlepšení akustických vlastností výrobních hal a pracovních prostorů v budovách pomocí akustických obkladů stěn a stropu. Takovými nákladnými opatření lze obecně zlepšit akustické prostředí v hale, ale v místech obsluhy nejhlučnějších strojů je jejich dopad nevýrazný. V kombinaci s opatřeními uvedenými předešle lze však zajistit zlepšení akustického prostředí na místech obsluhy méně hlučných strojů.
- Organizační a technologická opatření na snížení expozice hluku. Tato opatření jsou nejčastěji založena na střídání pracovníků obsluhy hlučných strojů, stanovení povinných přestávek spojených s prací nebo pobytem v klidových prostorech, stanovením přípustného počtu pracovních směn nebo ve změně technologie výroby aj.
- Použití osobních ochranných pracovních prostředků proti hluku. Chrániče sluchu je nutné používat, pokud hladina akustického tlaku A překračuje 85 dB. Jejich vložný útlum by měl být takový, aby za chrániči sluchu ve zvukovodu byla hladina hluku nižší než 85 dB. Při překročení expozice hluku do 10 dB se doporučují zátkové chrániče vkládané do zvukovodu. Při expozici nad 95 dB se doporučují sluchátkové chrániče a nad 100 dB se zpravidla nasazují protihlukové přilby, které omezují rovněž kostní vedení zvuku.



Obr.2 Příkladů snížení vibrací [1]



Obr.3 Snížení hluku perforovanými plechovými kryty [1]

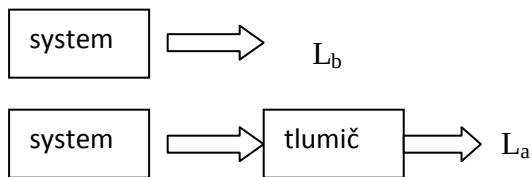
Pasivní metody snižování hluku

Snižováním hluku dochází k přeměně akustické energie na jiné druhy energií.

- Využití pasivních metod:
- využití tlumících vlastností některých přídavných látek nebo konstrukcí (pohltivost, izolace, antivibrační nátěry,..)
 - využití vnitřního tlumení struktury zařízení
 - vibroizolace strojů a přístrojů
 - interference zvuku

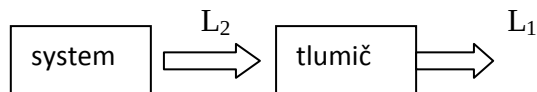
Používaná kritéria akustické efektivity tlumičů:

-vložný útlum IL



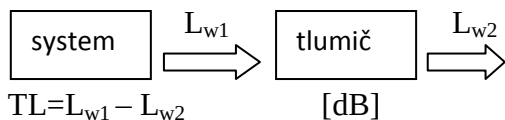
$$D \equiv IL = L_b - L_a \equiv \Delta R \text{ [dB]} \quad (1)$$

-redukce hluku NR



$$NR = L_2 - L_1 = 20 \cdot \log \left| \frac{p_2}{p_1} \right| \text{ [dB]} \quad (2)$$

-přenosová ztráta TL



$$TL = L_{w1} - L_{w2} \text{ [dB]} \quad (3)$$

Absorbéry zvuku

K přeměnám akustické energie dochází v důsledku tření, kolísání akustického tlaku a nepružných deformací těles (hystereze).

Absorbéry zvuku jsou definovány jako materiály pohlcující zvuk. Nejběžnější používanou strukturou jsou porézní materiály-(rohože, koberce, povlaky) a samotným materiálem potom bývá minerální nebo organická vlákna, dřevěné třísky, kokosová vlákna a drcený textil.

Základní charakteristiky:

- pórovitost

$$h = 1 - \frac{\rho_A}{\rho_M} = \frac{V_P}{V_C} = \frac{\text{objem pórů}}{\text{celkový objem}} \quad (4)$$

kde ρ_A [kg/m³] - hustota porézního materiálu

ρ_M [kg/m³] – hustota vláknitého materiálu

-odpor proti proudění (pro jednotkovou tloušťku materiálu)

$$R_1 = -\frac{1}{v} \frac{\Delta p}{\Delta x} = -\frac{tS}{V} \frac{\Delta p}{\Delta x} \text{ [N.s/m}^4\text{]} \quad (5)$$

kde Δp – statický rozdíl tlaků napříč homogenní vrstvy tloušťky Δx

v – rychlost proudění materiálem

V - objem vzduchu proudící skrze testovaný vzorek během doby t

S – plocha vzorku (na jedné straně)

-součinitel absorpce (příslušného povrchu)

$$\alpha = \frac{\text{pohlčená energie}}{\text{dopadající energie}} = 1 - |\beta^2| \quad (6)$$

kde β je součinitel odrazu

Plošné absorbéry

Vlastní absorpci zvuku lze vyšetřovat u velkých a rovných ploch absorbérů, aby tak byl snížen a vyloučen odraz a lom u hran ploch. Součinitel absorpce příslušného povrchu pak mimo (6) se dá také vyjádřit pro kolmý dopad akustických vln:

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{4} \left(\frac{X}{\rho_0 c} + \frac{\rho_0 c}{X} \right)} \quad (7)$$

kde X [Ns/m³] – reálná složka měrné akustické impedance daného materiálu

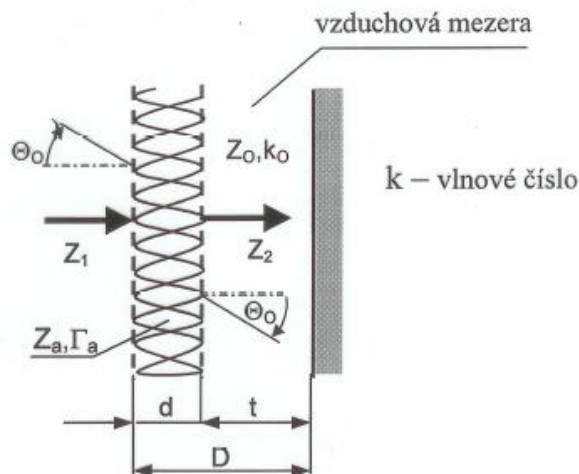
Součinitel odrazu při šikmém dopadu akustické vlny pod úhlem Θ na rozhraní absorpční plochy:

$$\beta(\Theta_0) = \frac{Z_1 \cdot \cos \Theta_0 - Z_0}{Z_1 \cdot \cos \Theta_0 + Z_0} \quad (8)$$

kde $Z_1 = X_1 + jY_1 = p/v_n$ – normálová komplexní specifická impedance stěny absorbérů

p – akustický tlak

v_n – normálová složka rychlosti kmitání částic na rozhraní



Obr.4 Schéma plošného absorbérů [1]

– konstanta šíření zvuku $\Gamma_a = \Gamma_R + j\Gamma_I$

Pak jsou:

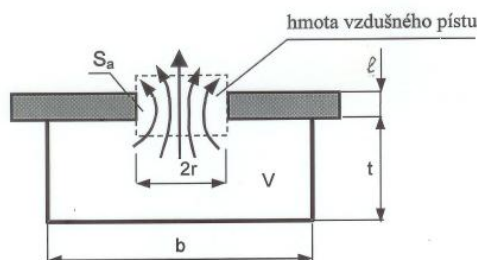
-součinitel odrazu

$$\beta = \frac{X_1 - Z_0}{X_1 + Z_0} \quad (9)$$

-součinitel pohltivosti (absorpce)

$$\alpha = \frac{4X_1 Z_0}{(X_1 + Z_0)^2 + Y_1^2} \quad (10)$$

Rezonanční absorbéry



Obr.5 Helmholtzův rezonátor [1]

Rezonanční frekvence Helmholtzova rezonátoru:

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S_a}{V \left(\ell + \frac{16r}{3\pi} \right)}} \quad (11)$$

kde S_a – plocha hrdla
 r – poloměr hrdla
 V – objem dutiny
 T – hloubka dutiny

Neprůzvučnost desek

Neprůzvučnost je definována jako zvukoizolační vlastnost, při které dochází ke snížení akustické energie ze vzdušného prostoru před deskou a za deskou.

Charakteristiky přenosu:

-činitel průzvučnosti desky

$$\tau(\Phi, \omega) = \frac{W_2(\Phi, \omega)}{W_1(\Phi, \omega)} \quad (12)$$

-stupeň vzduchové neprůzvučnosti

$$R(\Phi, \omega) = 10 \cdot \log \frac{1}{\tau(\Phi, \omega)} \quad [\text{dB}] \quad (13)$$

kde jsou: $W_1(\Phi, \omega)$, $W_2(\Phi, \omega)$ – akustický výkon vlnění před a za deskou a dopadající na desku pod úhlem Φ a s frekvencí ω

Pro tenké desky platí:

$$R(\Phi) = 10 \cdot \log \left(\frac{p_1^2}{p_2^2} \right) \quad (14)$$

kde p_1 , p_2 – akustické tlaky před a za deskou

Kritické frekvence f_K , při kterých se rovnají vlastní frekvence ohybových kmitů desky a akustického vlnění se nazývá *koincidenční kmitočty* a příslušný jev *koincidenční jev*.

$$f_K = \frac{\omega_K}{2\pi} = \left(\frac{c_0}{2\pi} \right)^2 \left\{ \frac{12 \cdot \rho_M (1 - \nu^2)}{E \cdot h^3} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

Pak platí pro stupeň vzduchové neprůzvučnosti:

$$R(\Phi) \cong 10 \cdot \log \left\{ 1 + \left[\frac{\rho_M h \omega \cos \Phi}{2 \rho_0 c_0} \left[1 - \left(\frac{f}{f_K} \right)^2 \sin^4 \Phi \right] \right]^2 \right\} \quad (16)$$

kde ρ_M – hustota materiálu desky
 h – tloušťka desky
 c_L – rychlost vlnění podélných vln v desce

Impedance desky:

$$Z_S = \frac{p_1 - p_2}{v_n} \quad (17)$$

kde jsou komplexní amplitudy akustických tlaků:

p_1 – výsledného na straně zdroje (součet akustických tlaků dopadající a odražené vlny)

p_2 – výsledný tlak za deskou

v_n – normálové rychlosti na obou stranách desky

Pro tenké desky lze psát:

$$\tau(\Phi) = \left| 1 + \frac{Z_S \cdot \cos \Phi}{2\rho_O c_O} \right|^2 \quad (18)$$

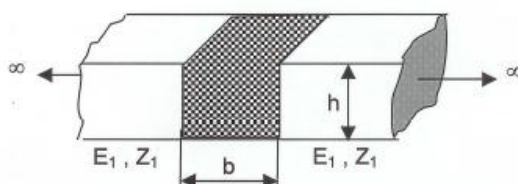
a pro stupeň vzduchové neprůzvučnosti:

$$R(\Phi) = 10 \cdot \log \frac{1}{\tau(\Phi)} = 10 \cdot \log \left\{ \left| 1 + \frac{Z_S \cos \Phi}{2\rho_O c_O} \right|^2 \right\} \quad (19)$$

Pružné vložky v konstrukcích

U pružných vložek je využíván princip reflexe vlnění na rozhraní ploch s rozdílnou mechanickou impedancí (čím je rozdíl větší, tím je přenos vlnění menší).

Vložný útlum pružné vložky, daný reflexí vlnění se vyhodnocuje zvlášť pro vlnění podélné a vlnění ohybové.



Obr.6 Pružná vložka [1]

Vložný útlum pro podélné vlnění:

$$\Delta R = 10 \cdot \log \left[1 + \left(\frac{\omega \cdot Z_1}{2c} \right)^2 \right] \quad [\text{dB}] \quad (20)$$

kde Z_1 [N.s/m] – impedance materiálu struktury pro podélné vlnění
 c [N/m] - tuhost pružné vložky v podélném směru

Vložný útlum pro ohybové vlnění

Pro ohybové vlnění vznikají dvě oblasti, u nichž je realizován kompletní přenos vlnění nebo kompletní odraz vlnění.

$$\Delta R \cong 10 \cdot \log \left[1 + \frac{1}{4} \left(1 - \frac{E}{E_1} \frac{2\pi^3 b h^2}{\lambda_B^3} \right)^2 \right] \quad (21)$$

kde E – Youngův modul pružnosti materiálu struktury

E_1 - Youngův modul pružnosti materiálu vložky

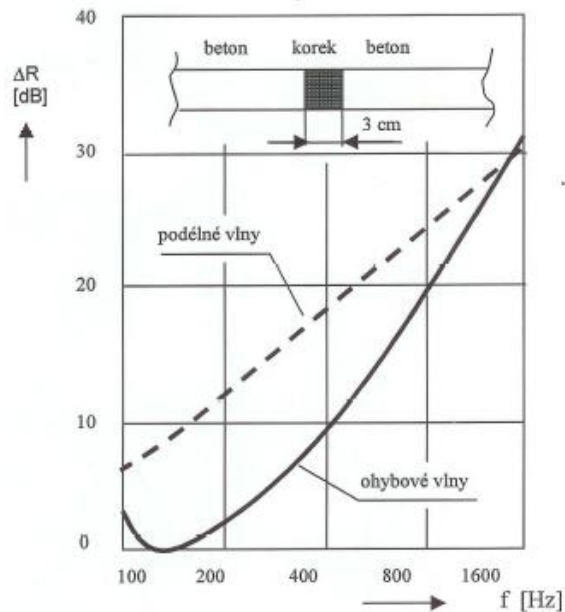
h – výška (tloušťka) struktury

λ_B – délka ohybových vln ve struktuře

Pro potlačení kompletního přenosu ohybových vln musí být:

- Poměr E/E_1 a délka pružné vložky b velké
- Musí být délka pružné vložky malá ve srovnání s délkou ohybových vln v pružné vložce (za účelem vyloučení rezonančních jevů)

Celkový odraz ohybového vlnění nastává při splnění podmínky $\lambda_{BS} = \pi \cdot h$ (viz obr.6)



Obr.6 Závislost vložného útlumu na frekvenci ohybových vln [1]

Antivibrační nátěry

Antivibrační nátěry se používají při tlumení hluku přes tenké desky a plechy. Nátěry se vyrábí z různých umělých hmot, takže mají odlišné hodnoty mechanických impedancí.

Součinitel vnitřního tlumení:

a) pro jednu vrstvu nátěru

$$\eta = \eta_2 \frac{E_2}{E_1} g\left(\frac{h_2}{h_1}\right)$$

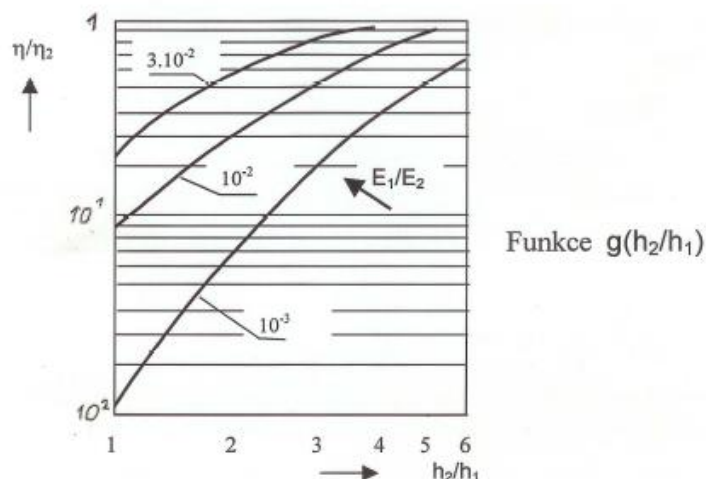
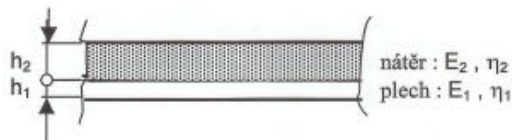
(22)

kde η – činitel vnitřního tlumení celé konstrukce

η_2 – činitel vnitřního tlumení antivibračního nátěru

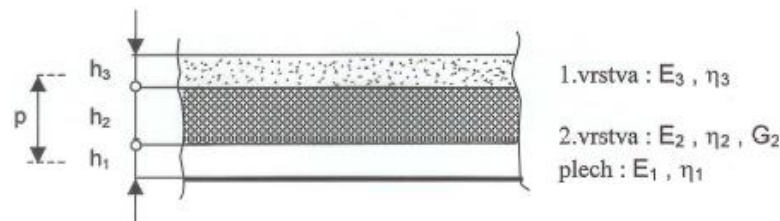
E_1 – modul pružnosti plechu

E_2 – modul pružnosti nátěru



Obr.7 Závislost pro součinitel vnitřního útlumu [1]

b) pro dvě vrstvy nátěru



Obr.8 Deska se dvěma vrstvami vibračního nátěru [1]

Výsledný činitel vnitřního tlumení:

$$\eta = \eta_2 \frac{E_3 h_3}{B_1} p^2 \frac{e}{1 + e^2} \quad (23)$$

kde B_1 [N.m] – ohybová tuhost základní desky struktury

p [m] – vzdálenost neutrálních rovin 1. a 3. vrstvy

e [-] – smykový parametr

kdy smykový parametr je dán vztahem:

$$e = \frac{c_{L1}}{4\pi\sqrt{3}} \frac{G_2}{E_2} \frac{h_1}{h_2 h_3} \frac{1}{f} \quad (24)$$

kde G_2 [N/m²] – modul pružnosti ve smyku tlumící vrstvy

f [Hz] – frekvence signálu

Maximální možnou hodnotu $\eta_{\max}$ určíme po dosazení za ohybovou tuhost:

$$\eta_{\max} = 3(1 - \mu_1^2) \eta_2 \frac{E_3 h_3}{E_1 h_1^3} p^2 \quad (25)$$

A bude jí dosaženo při frekvenci

$$\bar{f} = 4,59 \cdot 10^{-2} \cdot c_{L1} \frac{G_2}{E_3} \frac{h_1}{h_2 h_3} \quad (26)$$

Absorpční tlumiče hluku potrubních systémů

Základní parametry absorpčních tlumičů:

-vložný útlum D [dB]

-hydraulické ztráty Δp [Pa] proudícího média

-hluk generovaný proudícím médiem

-rozměry, cena, životnost

Vložný útlum absorpčního tlumiče:

$$D = 10 \cdot \log \frac{W_0}{W_M} \quad [\text{dB}] \quad (27)$$

kde W_0, W_M – akustické výkony vyzařované z potrubí bez a s použitým tlumičem.

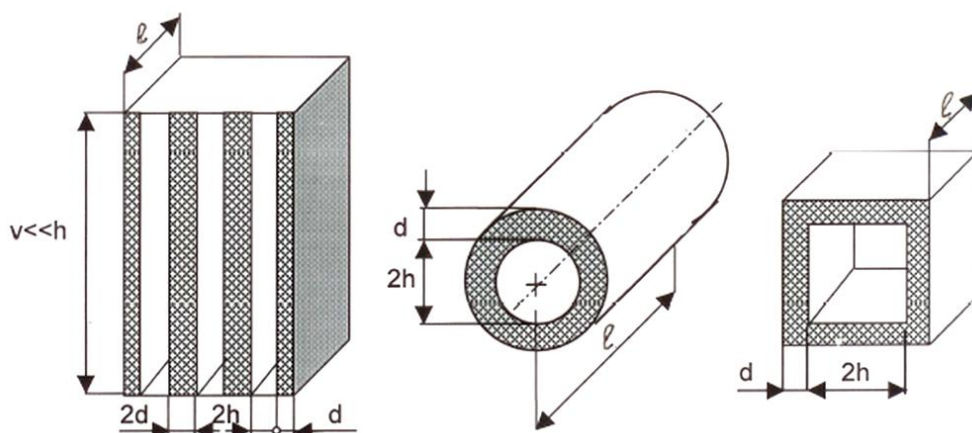
Akustický výkon konstrukce vyzařovaný s tlumičem:

$$W_M = W_0 \cdot 10^{-0,1(\Delta L_{\text{vst}} + \Delta L_\ell + \Delta L_{\text{výst}})} + W_{\text{GP}} \quad (28)$$

kde $\Delta L_{\text{vst}}, \Delta L_{\text{výst}}$ – vstupní a výstupní ztráty tlumiče

ΔL_ℓ – útlum tlumiče délky ℓ

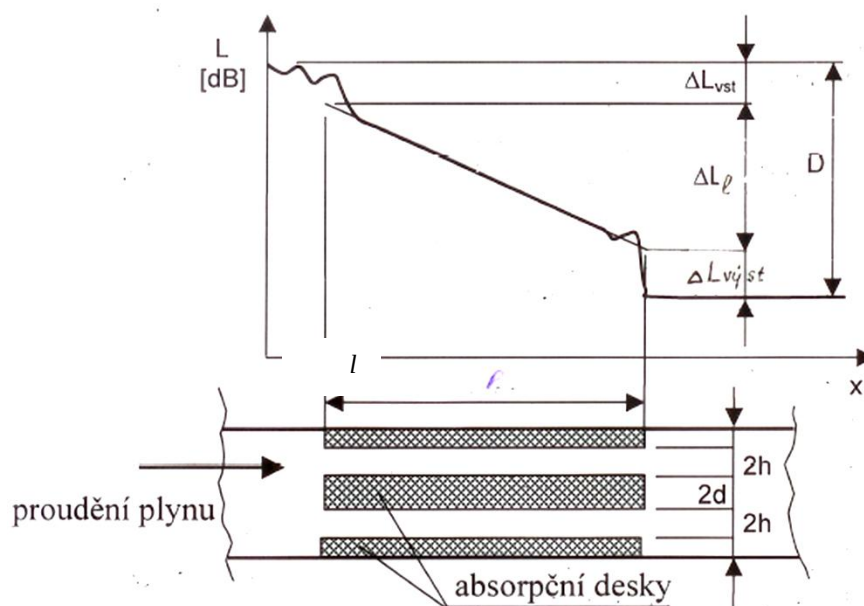
W_{GP} – akustický výkon generován proudícím plynem v tlumiči



Obr.9 Typy absorpčních tlumičů hluku potrubních systémů – paralelní příčky, válec, obdélník [1]

Při vyjádření vložného útlumu absorpčního tlumiče při malé rychlosti proudění plynu lze zanedbat hluk vznikající proudícím médiem a pak platí:

$$D \cong \Delta L_{vst} + \Delta L_{\ell} + \Delta L_{výst} \quad (29)$$



Obr.10 Grafické vyjádření ztrát [1]

Pro vlastní tlumič s obdélníkovým průřezem (s absorpčními deskami pouze na stranách kanálu) a pro nízké kmitočty ($2h < \lambda$) se tlumičem šíří rovinná akustická vlna, pro níž lze stanovit útlum:

$$\Delta L_{\ell} = 1,1 \frac{\alpha}{h} \ell \quad (30)$$

Tlumicí vlastnosti struktur

Vnitřní tlumení materiálu má vliv na:

- rychlejší zánik volných kmitů (rychlejší doznívání)
- rychlejší úbytek volně se šířících strukturálních vln v konstrukci se vzdáleností od zdroje vibrací, tím se zmenšuje plocha účinně vyzařující akustickou energii
- snížení amplitud vibrací v rezonanci
- snížení vyzařované akustické energie i mimo rezonance struktury
- snížení hodnoty nárůstu vibrací a tím i hluku při přechodu rezonančních oblastí
- snížení amplitud u samobuzených kmitů

Činitel vnitřních ztrát:

$$\eta = \frac{I_q}{I} = \frac{E_{dis}}{2\pi E_{celk}} = \frac{E_{Im}}{E_{Re}} \quad (31)$$

kde I_q, I [W/m²] – intenzity chvění struktury přeměněné na teplo a celková intenzita chvění

E_{dis}, E_{celk} – dissipovaná energie a celková energie systému během jednoho cyklu

E_{Re}, E_{Im} – reálná a imaginární část dynamického modulu pružnosti v tahu materiálu

Pro komplexní modul pružnosti platí vztah:

$$E = E_{Re} + j.E_{Im} = E_{Re}(1 + j.\eta) \quad (32)$$

Použitá literatura:

- [1] – Mišun V., *Vibrace a hluk*, skript VUT Brno, 2005
- [2] – Nový R., *Hluk a chvění*, ČVUT Praha, 2009
- [3] - <http://www1.szu.cz/chpnp/>
- [4] - <http://www.szu.cz/tema/pracovni-prostredi/>