

Studium akustických vlastností vybraných plastových materiálů

Petr Hřebačka

Bakalářská práce
2007



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav inženýrství polymerů

akademický rok: 2006/2007

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr HŘEBAČKA**
Studijní program: **B 2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Chemie a technologie materiálů**

Téma práce: **Studium akustických vlastností vybraných
plastových materiálů**

Zásady pro vypracování:

Rešerže na téma:

- | akustické vlastnosti materiálů,
- | plastové materiály,
- | využití plastových materiálů při odhlučnění interiérů.

Experimentální vyhodnocení koeficientu zvukové pohltivosti vybraných plastových materiálů.

Experimentální vyhodnocení útlumových charakteristik vybraných plastových materiálů.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

SMETANA, Ctirad a kol. Hluk a vibrace, měření a hodnocení. 1. vyd. Praha : Sdělovací technika, 1998. 188 s. ISBN 80-901936-2-5

VAŇKOVÁ, M. a kol. Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí, část I. 1. vyd. Brno : Vysoké učení technické, 1995. 144 s. ISBN 80-214-0695-X.

VAŇKOVÁ, M. a kol. Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí, část II. 1. vyd. Brno : Vysoké učení technické, 1996. 164 s. ISBN 80-214-0818-9.

NOVÝ, R. Hluk a chvění. 2. vyd. Praha : České vysoké učení technické, 2000. 389 s. ISBN 80-01-02246-3.

EVEREST, F. Alton. Master Handbook of Acoustics. 4. vyd. USA : McGraw-Hill/TAB Electronics, 2001. 592 s. ISBN 0071360972.

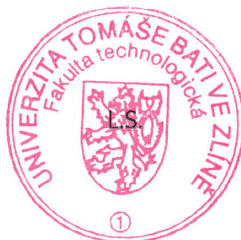
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Dušan Fojtů**
Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **11. listopadu 2006**

Termín odevzdání bakalářské práce: **21. května 2007**

Ve Zlíně dne 5. února 2007


prof. Ing. Ignác Hoza, CSc.
děkan




prof. Ing. Milan Mládek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá měřením frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti vybraných plastových materiálů. Pro měření byly vybrány materiály: polyvinylchlorid, polypropylen a extrudovaný polystyren. Měření bylo provedeno na dvoumikrofonové impedanční Kundtově trubici společnosti Brüel&Kjaer v rozsahu 16 – 6300 Hz. Z těchto měření byla vyhodnocena vhodnost materiálů pro aplikaci v průmyslu vzhledem k akustickým vlastnostem měřených materiálů.

Klíčová slova: Koeficient zvukové pohltivosti, Kundtova trubice, Polyvinylchlorid, Polypropylen, Extrudovaný polystyren, Plastové materiály, Plasty, PVC, PP, EPS.

ABSTRACT

This work is focused on measurement of the relationship of sound absorption coefficient on frequency for selected plastic materials. Materials as polyvinylchloride, polypropylene and extruded polystyrene were selected. Measurement was realized on the dual-microphone impedance Kundt tube Brüel & Kjaer in range 16-6300 Hz. Applicability of materials for application in industry with respect to acoustic properties was evaluated from these measurements.

Keywords: Sound absorption coefficient, Kundt tube, Polyvinylchloride, Polypropylene, Extruded Polystyrene, Plastic materials, Plastics, PVC, PP, EPS.

Chtěl bych tímto poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Dušanovi Fojtů za odborné vedení, připomínky a cenné rady, které mi poskytoval v průběhu vypracování bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval prof. Ing. Lubomíru Lapčíkovi Ph.D. za možnost tvořit tuto práci na Ústavu fyziky a materiálového inženýrství a všem dalším, kteří mi byli při řešení problémů s ní souvisejících nějakým způsobem nápomocni.

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně dne 4.8.2007

.....

podpis bakaláře

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 ZVUK.....	11
1.1 AKUSTICKÉ VLNĚNÍ	11
1.1.1 Vlnová délka	12
1.1.2 Akustická rychlost.....	13
1.1.3 Akustický tlak	14
1.2 RYCHLOST ŠÍŘENÍ PODÉLNÝCH VLN V PEVNÝCH LÁTKÁCH.....	15
1.3 RYCHLOST ŠÍŘENÍ PŘÍČNÝCH VLN V PEVNÝCH LÁTKÁCH	16
2 MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH IMISÍ.....	18
2.1 HLUK V PRACOVNÍM PROSTŘEDÍ.....	19
2.2 HLUK VE VENKOVNÍM PROSTŘEDÍ A VE STAVBÁCH PRO BYDLENÍ A STAVBÁCH OBČANSKÉHO VYBAVENÍ	20
2.3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VÝBĚR METOD MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH IMISÍ A ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ.....	21
2.4 DOBA A DÉLKA MĚŘENÍ	22
2.4.1 V pracovním prostředí.....	22
2.4.2 V mimopracovním prostředí	22
2.4.3 Hluk z leteckého provozu.....	23
2.5 POVAHA HLUKU	23
2.5.1 Ustálený hluk.....	23
2.5.2 Proměnný hluk	23
2.5.3 Určení povahy hluku	23
2.5.4 Kmitočtové složení hluku	24
2.5.5 Tónový charakter (tónovost) zvuku	24
2.6 HLUK POZADÍ	25
2.7 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI PROSTŘEDÍ.....	25
2.8 AKUSTICKÉ IMISE	26
2.8.1 Maximální přípustné hodnoty akustických imisí	26
2.9 ZÁZNAM O MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH IMISÍ	27
2.9.1 Minimální požadavky na záznam o měření akustických imisí.....	27
2.10 OMEZOVÁNÍ IMISÍ HLUKU	27
3 ZÁSTĚNY A ZVUKOIZOLAČNÍ KRYTY	29
3.1 ZÁSTĚNY	29
3.1.1 Účinky zástěn	29
3.1.2 Realizace zástěn	30

3.2	ZVUKOIZOLAČNÍ KRYTY	31
3.2.1	Zvukoizolační účinek	31
3.2.2	Realizace zvukoizolačních krytů.....	32
3.3	ZVUKOTĚSNÉ KABINY	33
3.3.1	Realizace zvukotěsných kabin.....	33
3.4	POLOUZAVŘENÉ KRYTY	34
3.4.1	Účinky polouzavřených krytů	34
3.4.2	Realizace polouzavřených krytů.....	35
4	AKUSTICKÉ VLASTNOSTI POHLTIVÝCH MATERIÁLŮ A JEJICH APLIKACE V PRAXI	36
4.1	VLASTNOSTI MATERIÁLŮ POHLCUJÍCÍCH ZVUK	37
4.2	ČINITEL ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI	39
4.3	POHLTIVÉ KONSTRUKCE	41
4.3.1	Pohltivé obklady.....	41
4.3.2	Pohltivé konstrukce založené na rezonančním principu	42
4.3.2.1	Pohltivá konstrukce typu Helmholtzova rezonátoru.....	42
4.3.2.2	Kmitající membrány a desky	44
4.3.2.3	Akustická tělesa	45
4.3.2.4	Absorpční tlumiče.....	45
4.4	SNIŽOVÁNÍ HLUKU V UZAVŘENÝCH PROSTORECH.....	46
II	PRAKTICKÁ ČÁST	48
5	CHARAKTERISTIKA VYBRANÝCH MATERIÁLŮ	49
5.1	POLYVINYLCHLORID (PVC)	49
5.1.1	Charakteristika PVC.....	49
5.1.2	Výroba PVC	49
5.2	EXTRUDOVANÝ POLYSTYREN (EPS).....	50
5.2.1	Charakteristika extrudovaného polystyrenu	50
5.2.2	Výroba extrudovaného polystyrenu.....	50
5.2.3	Akustické vlastnosti extrudovaného polystyrenu	51
5.3	POLYPROPYLEN (PP)	52
5.3.1	Charakteristika PP	52
5.3.2	Výroba PP	52
5.3.2.1	Výroba v plynné fázi.....	52
5.3.2.2	Výroba v suspenzi.....	53
5.4	APLIKACE PLASTOVÝCH MATERIÁLŮ V PRŮMYSLOVÉ VÝROBĚ.....	53
5.4.1	Plastová okna	53
5.4.2	Vlastnosti PVC oken	55
5.4.2.1	Vlastnosti suroviny	55
5.4.2.2	Tepelná izolace	55
5.4.2.3	Zvuková izolace	56
5.4.3	Vodovodní a odpadní potrubí.....	56

6	STANOVENÍ KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI.....	60
6.1	ROZMĚROVÁ ANALÝZA VYBRANÝCH VZORKŮ.....	60
6.2	MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI VYBRANÝCH PLASTOVÝCH MATERIÁLŮ.....	61
6.2.1	Měřicí zařízení	61
6.2.2	Návod na obsluhu Brüel & Kjaer trubice s obslužným programem BZ 5050.....	62
6.2.3	Vyhodnocení měření koeficientu zvukové pohltivosti vybraných plastových materiálů.....	63
ZÁVĚR	.....	64
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	.....	65
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	.....	67
SEZNAM OBRÁZKŮ	.....	70
SEZNAM TABULEK	.....	71
SEZNAM PŘÍLOH	.....	72

ÚVOD

Hluk a jeho nežádoucí účinky na zdraví člověka jsou známy již po několik desetiletí. Ovšem akceptace tohoto faktu v běžném provozu se projevuje až v posledních několika letech. Člověk, který je obklopen nadměrným šumem a nepříjemným hlukem vykazuje nižší pracovní výkony než v prostředí, které těmito účinky nedisponuje. Proto nutnost hledání optimalizace mezi užitnými vlastnostmi pracovních strojů, náradí, výrobků a eliminací nepříznivých akustických elementů se stává důležitým faktorem při výběru pracovního místa, ba dokonce celého životního okolí člověka.

Rozvoj plastů a plastových materiálů umožnil jejich aplikaci do mnoha průmyslových odvětví. Zejména ve stavebním průmyslu, kdy jsou tradiční materiály jako dřevo, keramika, materiály na minerální bázi, textilní materiály a jiné nahrazovány plasty, je tento evoluční trend velmi zřetelný.

Mezi plastové materiály, které se široce využívají v akusticko-izolačních a tlumících aplikacích, patří polyuretan (odzvučení leteckých kabin, automobilů), extrudovaný polystyren (stavební příčky), polyvinylchlorid (podlahové krytiny) a další.

Akusticko-izolační vlastnosti materiálů se udávají ve stupni absorpce zvuku α (alfa) a je to poměr absorbované energie k celkové zvukové energii, která přichází k objektu. Při úplné absorpci $\alpha = 1$, při úplné reflexi $\alpha = 0$. Čím větší je tento koeficient zvukové pohltivosti, tím lepší jsou akusticko-izolační a tlumící vlastnosti materiálu.

Tato práce se zabývá měřením a vyhodnocením koeficientu zvukové pohltivosti vybraných plastových materiálů. Pro měření byl vybrán polyvinylchlorid, polypropylen a extrudovaný polystyren.

Výběr materiálů pro tuto práci ovšem není orientován na materiály s vynikajícími akustickými vlastnostmi, ale na materiály nejdostupnější a nejrozšířenější ve stavebním průmyslu.

Na základě měření byla vyhodnocena vhodnost použití těchto materiálů s ohledem na jejich akustické a mechanické vlastnosti.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZVUK

Podstatou zvuku je mechanické kmitání pružného prostředí ve frekvenčním rozsahu 20 až 20000 kmitů za sekundu, které se šíří konečnou rychlostí určitým prostředím. Akustická vlna se ve vzduchu pohybuje rychlostí cca 340 m/s. Frekvenční rozsah akustického vlnění, kterým se zabývá technická akustika, odpovídá kmitočtovému rozsahu lidského ucha. Jinak se akustika zabývá mechanickými kmity v širším frekvenčním pásmu. Hovoříme potom o třech pásmech: o infrazvuku, slyšitelném pásmu a ultrazvuku.

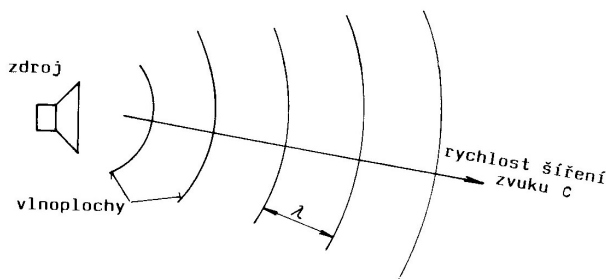
1.1 Akustické vlnění

Zvuk se může šířit v plynech, kapalinách i pevných látkách ve formě akustického vlnění. V homogenním izotropním prostředí se šíří vlnění přímočaře. Podle toho, zda částice prostředí kmitají ve směru šíření vlnění nebo kolmo k němu, dělíme vlnění na podélné a příčné. Zatímco u podélného vlnění je směr kmitů jednoznačně dán směrem šíření vlnění, u příčného vlnění musíme udávat též rovinu ve které dochází k příčným kmitům. Pokud se všechny kmity dějí v jedné rovině, říkáme o takovém vlnění, že je lineárně polarizováno.

Důležitou skutečností je, že se částice jednosměrně nepohybují se šířícím se vlněním, nýbrž kmitají pouze kolem svých rovnovážných poloh. Dalším závažným faktem je, že šíření akustického vlnění je spojeno s přenosem energie.

U plynů a kapalin se může vyskytovat pouze podélné akustické vlnění, neboť tyto látky jsou pružné pouze ve smyslu objemové stlačitelnosti. U materiálů elastických se může vyskytovat vlnění podélné i příčné, protože vykazují pružnost nejenom v tahu a tlaku, ale i smyku. Kombinací těchto namáhání vzniká kmitání ohybové.

Akustické vlnění postupuje prostředím od zdroje zvuku ve vlnoplochách, jak je ukázáno schematicky na obr. 1. Vlnoplocha se vyznačuje tím, že v jejích všech bodech je v daném časovém okamžiku stejný akustický stav. Kolmice na vlnoplochu se nazývá akustickým paprskem.

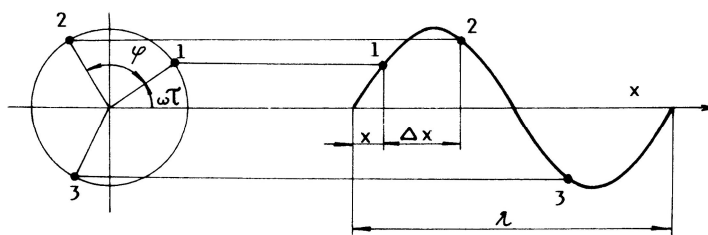


Obr. 1. Šíření zvuku od zdroje.

Mezi pevnými látkami a plyny resp. kapalinami může docházet k přenosu kmitů. Každý hmotný element prostředí může být tzv. oscilátorem. Vychýlením hmotného bodu z jeho rovnovážné polohy se poruší rovnováha sil a začnou převládat síly, které se snaží hmotný bod vrátit do rovnovážné polohy. Z uvedeného vyplývá, že můžeme nejjednodušší fyzikální oscilátory, jako je např. struna, ladička, pružina apod. považovat za akustické generátory.

1.1.1 Vlnová délka

V obr. 2 je zakótována veličina λ [m], která se nazývá délkou vlny. Je to vzdálenost mezi nejbližšími dvěma body bodové řady, u nichž je v daném časovém okamžiku stejný akustický stav. Jinak lze říci, že je to vzdálenost, kterou zvuková vlna urazí za dobu jednoho kmitu T . Délka vlny je důležitým akustickým parametrem, který umožňuje modelování v akustice. Mezi délkou vlny λ , frekvencí f a rychlostí šíření zvuku c platí $\lambda f = c$:



Obr. 2. Akustická výchylka jako funkce vzdálenosti.

1.1.2 Akustická rychlost

Rychlost s jakou kmitají jednotlivé částice prostředí, kterým se šíří akustická vlna, nazýváme akustickou rychlostí v [m/s]. Výraz pro její výpočet získáme snadno, provedeme-li první parciální derivaci akustické výchylky (1) podle času.

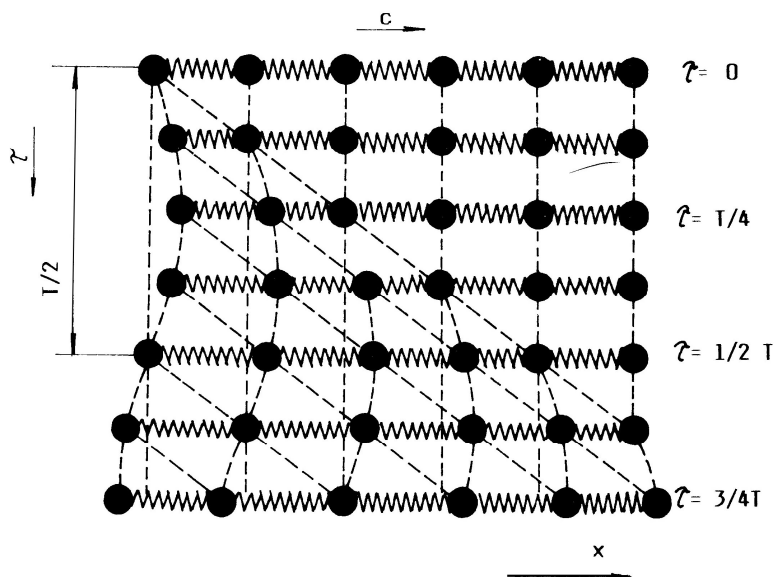
$$u = u_0 \sin \omega \left(\tau \pm \frac{x}{c} \right) \quad (1)$$

$$v = \frac{\partial u}{\partial \tau} = \omega u_0 \cos \omega \left(\tau \pm \frac{x}{c} \right) \quad (2)$$

Součin amplitudy výchylky a kruhové frekvence dává amplitudu akustické rychlosti.

$$v_0 = \omega u_0 \quad (3)$$

Porovnáme-li mezi sebou vztahy (1) a (2) zjistíme, že se výchylka od akustické rychlosti liší jak amplitudou, tak i fází. Funkce \sin je proti funkci \cos fázově pootočená o $\pi/2$. Akustická rychlost je jednou z nejdůležitějších akustických veličin a je jí nutno přísně odlišovat od rychlosti šíření zvuku. Její velikost je o mnoho řádů menší než rychlost šíření zvuku.



Obr. 3. Vývoj akustické vlny v bodové řadě.

1.1.3 Akustický tlak

Na obr. 3 je mimo jiné znázorněno, že při šíření vlnění v bodové řadě lze v daném časovém okamžiku najít místa, kde dochází ke shluku většího počtu kmitajících bodů a naopak také místa, kde je menší hustota molekul. Tomu odpovídají v plynech a kapalinách místa přetlaku a místa podtlaku. S tímto zhuštěním a zředěním částic souvisí změny celkového statického tlaku vzduchu. Na obr. 4 je vyznačen celkový statický tlak jako součet středního barometrického tlaku p_b a tlaku akustického p . Diagram je možno také interpretovat tak, že na barometrickém tlaku je namodulován tlak akustický. Barometrický tlak je hodnota přibližně 100 000 Pa, kdežto akustický tlak je veličina o mnoho řádů nižší. Zdravé lidské ucho začíná vnímat akustické tlaky od hodnot $2 \cdot 10^{-5}$ Pa, což je v porovnání s barometrickým tlakem hodnota téměř zanedbatelná.

Průběh akustického tlaku je z hlediska matematického zápisu totožný s průběhem akustické výchylky nebo akustické rychlosti. Pro harmonický signál možno psát výraz

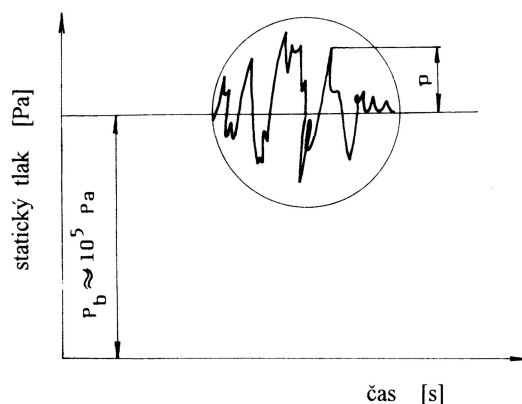
$$p = p_0 \cos \omega \left(\tau - \frac{x}{c} \right) \quad (4)$$

Resp.:

$$p = p_0 e^{j\omega \left(\tau - \frac{x}{c} \right)} \quad (5)$$

p_0 amplituda akustického tlaku [Pa]

p komplexní hodnota akustického tlaku [Pa]



Obr. 4. Časový průběh celkového statického tlaku ve vzduchu.

1.2 Rychlost šíření podélných vln v pevných látkách

Obecná úloha určit rychlost šíření akustického vlnění v pevných látkách je velice složitá. Proto jsme nejprve odvodili jednoduchý výraz (6), který platí pro šíření podélných vln v tenkých tyčích.

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (6)$$

kde je E [N/m²] dynamický modul pružnosti v tahu.

Budeme-li sledovat šíření akustických vln v deskách, musíme již do vztahů zahrnout vliv kontrakce ve formě Poissonova poměru

$$\mu = \frac{E - 2G}{2G}, \quad (7)$$

kde je G [N/m²] modul pružnosti ve smyku

Pro rychlost šíření podélných vln v desce potom platí vzorec:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{1 - \mu^2}} \quad (8)$$

U běžných materiálů, u nichž je Poissonův poměr malý, se prakticky neliší rychlosti šíření podélných vln v tyči a v desce. U pryže ($\mu = 0,49$), která je prakticky nestlačitelná, činí rozdíl mezi výsledky podle vzorců (6) a (8) cca 15%.

Přehled o rychlostech šíření podélných vln v tekutinách a v tyčích z různých materiálů získáme z tabulky 1. Nutno upozornit na to, že pro výpočet rychlosti šíření zvuku v určitém materiálu je třeba znát dynamický modul pružnosti. U některých materiálů je rozdíl mezi dynamickým modulem pružnosti a statickým modulem pružnosti dosti veliký a když ho zanedbáme dopustíme se velkých omylů.

V tabulce 1 je uvedena také hodnota měrné akustické impedance, která je dána u rovinné akustické vlny poměrem mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí. Tento poměr se rovná součinu hustoty a rychlosti šíření zvuku.

Tab. 1. Rychlost šíření podélných vln v různých látkách.

materiál	ρ [kg/m ³]	E [N/m ²]	c_L [m/s]	Z [Ns/m ³]
vzduch 20 °C	1,21	-	344	4,14.10 ²
voda 13 °C	1000	-	1440	5,12.10 ²
pryž měkká	900	4,4.10 ⁴	70	6,3.10 ⁴
pryž tvrdá	1100	2,2.10 ⁹	1400	1,5.10 ⁶
korek	250	6,3.10 ⁷	500	1,3.10 ⁵
dřevo bukové	650	1,0.10 ¹⁰	3900	2,5.10 ⁶
hliník	2700	6,2.10 ¹⁰	4800	1,3.10 ⁷
ocel	7850	2,6.10 ¹¹	5750	4,5.10 ⁷
olovo	11400	2,3.10 ¹⁰	1410	1,6.10 ⁷
pórobeton	900	2,9.10 ⁹	1800	1,6.10 ⁶
azbestocement	1950	1,8.10 ¹⁰	3040	5,9.10 ⁶
beton	2300	2,2.10 ¹⁰	3100	7,1.10 ⁶
cihly	2000	1,6.10 ¹⁰	2800	5,6.10 ⁶
sádra	1050	4,4.10 ⁹	2040	2,1.10 ⁶
sklo	2700	7,5.10 ¹⁰	5270	1,4.10 ⁷
překližka	700	9,3.10 ⁹	3645	2,6.10 ⁶
sololit	1000	4,7.10 ⁹	2170	2,2.10 ⁶
polystyrén	13	1,3.10 ⁶	315	4,1.10 ³
novopdur	1450	1,0.10 ⁹	850	4,8.10 ⁵
silon	4450	1,8.10 ⁹	1250	1,44.10 ⁶
plexisklo	1200	3,0.10 ⁹	1580	1,9.10 ⁶
epoxy 2000	1200	3,5.10 ⁹	1700	2,0.10 ⁶

1.3 Rychlost šíření příčných vln v pevných látkách

Rychlost šíření příčného vlnění c_T je možno počítat ze vztahu

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (9)$$

Dosazením z rovnice (7) získáme výraz, který ukazuje, že poměr mezi rychlostí podélných vln a příčných vln je konstantní. Opět nutno upozornit, že rychlost podélných vln i příčných vln v tyčích a deskách je nezávislá na kmitočtu.

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}} \quad (10)$$

Pro běžné konstrukční materiály je $\mu = 0,3$, z čehož po dosazení do (10) plyne závěr, že rychlost příčných (torzních) vln činí cca 62% z rychlosti podélných vln.

$$c_T = 0,62 c_L \quad (11)$$

Je třeba dodat, že pro výpočet rychlosti šíření zvuku je nutno používat dynamické moduly pružnosti, jejichž hodnota bývá u některých materiálů 5 až 20 krát větší než je hodnota statických modulů pružnosti. [1]

2 MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH IMISÍ

Metody měření a hodnocení hluku v místě pobytu osob jsou legislativně zabezpečeny Vyhláškou č. 13/1977 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. Směrnice, jimiž se stanoví způsob měření a hodnocení hluku a ultrazvuku v pracovním prostředí, (Směrnice č.42), směrnice, jimiž se stanoví způsob měření a hodnocení hluku ve stavbách pro bydlení, ve stavbách občanského vybavení a ve venkovním prostoru (Směrnice č. 43) a směrnice, jimiž se stanoví způsob měření a hodnocení hluku z leteckého provozu (Směrnice č. 44), jsou částí této vyhlášky. Od roku 1992 je v platnosti norma ČSN ISO, část 1, 2, 3 (1996). Popis a měření hluku prostředí, která stanoví základní veličiny pro popis hluku v mimopracovním prostředí a doporučuje základní postupy pro jejich stanovení. Norma stanoví metody měření hlukových charakteristik strojů, technologických zařízení a jiných výrobků a také popisuje metody měření hluku v místech pobytu osob. Určuje obecné principy použití metod měření hluku a měřené veličiny, které jsou nutné pro získání informací o hluku, hodnocení hladin hluku a provedení opatření pro jeho snižování.

Při měření akustických imisí zjišťujeme údaje, které jsou významné z hlediska posouzení působení hluku na člověka a při hodnocení akustické kvality prostředí. Jsou to zejména hladina akustického tlaku $A - L_{pA}$, její časový průběh, ekvivalentní hladina akustického tlaku $A - L_{Aeq}$, kmitočtové složení hluku, impulzní a neimpulzní charakter hlukového signálu, charakter akustického pole apod. Výsledky měření se používají pro obecnou informaci o hlukové situaci v místech pobytu osob, pro srovnání naměřených hodnot s přípustnými hodnotami uvedenými v Hygienických předpisech, normách a jiné dokumentaci a v neposlední řadě také ke zhodnocení účinnosti plánovaných a realizovaných opatření ke snížení hluku v budovách i vnějším prostředí.

Metody měření akustických imisí se stanovují s ohledem na:

- účel měření
- místo měření (venkovní prostor, uvnitř budovy, pracovní prostředí)
- požadovanou přesnost měření
- dobu trvání hluku
- charakter hluku (časový průběh, kmitočtové složení)
- charakter zvukového pole (pole přímých vln, pole odražených vln)

- hluk pozadí
- fyzikální vlastnosti měřeného prostředí (rychlost větru, teplota, vibrace, elektromagnetické pole apod.)

Existuje řada reálných situací, kdy správné měření a vyhodnocení naměřených údajů může podstatně ovlivnit hodnocení hlukové situace. Zvláště tehdy, kdy vznikají pochybnosti, zda jsou dodržovány nebo naopak překračovány nejvyšší přípustné hodnoty hluku. Pak významně záleží na teoretických znalostech i praktických zkušenostech experimentátora.

Při měření se nejčastěji používají integrační zvukoměry, hlukové dozimetry, datové záznamníky pro vzorkování rozložení hladin akustického tlaku v čase a statistické hladinové analyzátoři pro určení procentních hladin. Před každým měření a po skončení každé série měření je třeba provést kalibraci všech přístrojů.

2.1 Hluk v pracovním prostředí

Při měření imisních hodnot na pracovištích rozlišujeme:

- přímé měření hlukové zátěže osob
- měření hluku na pracovních místech
- měření hluku v pracovních prostorech

Při přímém měření hlukové zátěže se mikrofon umístí přímo na exponovanou osobu. S oblibou se používá dozimetry, který se zpravidla vkládá do levé horní vnější kapsy pracovního oděvu. Při měření je třeba dbát na to, aby při práci byla použita správná technologie a aby pracovní doba byla využívána obvyklým způsobem.

Měření hluku na pracovních místech se provádí tehdy, jestliže se pracující během směny zdržují převážně na jednom pracovním místě a při pobytu mimo toto místo se nepohybují v prostorech, ve kterých je hladina akustického tlaku (L_{pA}), o více jak 10 dB větší než hluk na jejich pracovních místech. Mikrofon se umístí přímo na pracovní místa ve výšce hlavy exponované osoby. V případě sedící osoby do výšky 70 cm nad sedadlem, v případě, že osoba pracuje vstoj, 150 cm nad podlahou. Při měření za přítomnosti pracovníka se volí měřicí místo ve vzdálenosti 20 cm od ucha těchto osob. Na zvukoměru se volí časová charakteristika F (Fast) pro ustálený a proměnný hluk a I (Impulse) pro hluk impulzního charakteru.

Údaje o hluku na pracovních místech lze využít také jako podklad pro nepřímé zjištění hlukové zátěže exponovaných osob.

Měření hluku v pracovním prostoru se používá zejména tam, kde pracovníci převážnou část směny přecházejí a mění pracovní místa. V tomto případě se měří hluk obvyklým způsobem v určitém počtu měřicích míst charakteristických pro daný prostor. Doporučené metody měření a zpracování jsou podrobně uvedeny v Příloze č.42 Vyhlášky č. 13/1977 Sb. Pokud pracující při pobytu mimo pracovní prostor nejsou vystaveni hladinám akustického tlaku A o více jak 10 dB vyšším než je hladina akustického tlaku A v pracovním prostoru, slouží tato měření také jako podklad pro nepřímé určení hlukové zátěže pracujících.

2.2 Hluk ve venkovním prostředí a ve stavbách pro bydlení a stavbách občanského vybavení

Při měření imisních hodnot v mimopracovním prostředí existují dvě hlavní lokality, kde se provádí hodnocení akustického klimatu:

- venkovní prostředí
- prostředí uvnitř budov

Při měření hluku ve venkovním prostoru např. mezi obytnými budovami, v parcích apod. se měří na jednom nebo několika místech a to vždy tam, kde se zdržuje nejdéle největší počet lidí, nebo v místech, kde jsou lidé nejvíce obtěžováni hlukem, a nebo v místech, která jsou rozhodující pro šíření hluku do chráněného prostoru. Je-li rozdíl hladin akustického tlaku A mezi sousedními měřicími místy větší jak 5 dB, je třeba počet měřicích míst zvýšit. Při hodnocení hlukové situace obytných budov je rozhodující místo před fasádou budovy, v níž jsou okna obytných místností. Měřicí mikrofon upevněný na nekmitající tyči se umístí před zavřená okna v příslušném podlaží budovy ve vzdálenosti 2 m od fasády směrem ven z budovy kolmo na obvodový plášť tak, aby osa nejvyšší citlivosti směřovala k hlavnímu zdroji hluku. Je-li zdrojem hluku hluk z leteckého provozu, volí se měřicí místa minimálně 2 m od obvodových stěn objektů a mikrofon ve výšce nejméně 1,5 m nad povrchem okolí se orientuje tak, aby hlavní osa citlivosti mikrofonu byla vertikální a směřovala vzhůru.

Při měření hluku uvnitř budov rozlišujeme měření v obytných místnostech bytů a měření v budovách sloužících k ubytování osob nebo v budovách občanského vybavení. V obytných místnostech bytů provádíme měření zpravidla ve středu místnosti ve vzdálenosti nejméně

1,5 m od okna a 1 m od stěn. V ostatních budovách volíme měřicí místo tam, kde se zdržuje největší počet lidí nebo tam, kde při předběžném měření byla zjištěna největší hladina akustického tlaku A . Liší-li se hladina akustického tlaku A na sousedních místech o více jak 5 dB, je třeba provést měření a vyhodnocení na větším počtu měřicích míst. Výška mikrofónu se volí v obvyklých případech 1,2 až 1,5 m nad podlahou. Okna i dveře v měřených místnostech musí být zavřeny a musí být zamezeno vzniku hluku z činnosti osob zde bydlících.

Pro všechna měření ustáleného a proměnného hluku je z hlediska posuzování jeho vlivu na zdraví předepsáno měření při dynamice měřidla F (Fast). Při měření impulzního hluku je předepsána dynamika měřidla I (Impulse). Hodnotící veličiny a jejich maximální přípustné hodnoty jsou stanoveny podle toho, zda hluk proniká do budovy zvenčí nebo zda je hodnocen hluk šířící se ze zdrojů uvnitř budovy.

Je-li příčinou hluku v místnosti nebo budově hluk pronikající z venkovního prostředí, je třeba provést vždy buď současné měření vnějšího hluku nebo není-li možné provést současná měření, provede se měření venkovního hluku za přibližně stejných hlukových podmínek.

2.3 Faktory ovlivňující výběr metod měření akustických imisí a zpracování výsledků

Přesnost měření akustických imisí a jejich hodnocení závisí na použitém způsobu měření a množství získaných údajů. Byly zavedeny tři třídy přesnosti měření:

- Speciální (podrobná) měření, I. třída přesnosti, slouží k hodnocení hluku ve zvláštních případech. Tato měření vyžadují použití zvukoměrů a měřicích) řetězců 1. a 2. třídy přesnosti s pásmovými filtry umožňující podrobnou frekvenční a časovou analýzu hluku. (Výsledek měření se od skutečné hodnoty liší o méně jak 0,5 dB).
- Běžná (kontrolní) měření, II. třída přesnosti, se užívají k získání podrobnějších informací o hluku, eventuelně k porovnání výsledků měření s hygienickými předpisy. Používají se přesné zvukoměry s pásmovými filtry, zařízení pro měření ekvivalentních hladin apod. (Výsledek měření se od skutečné hodnoty liší o méně než 2 dB).
- Přehledová měření, III. třída přesnosti, slouží k získání základních informací o hluku v místech pobytu lidí. Měří se jednoduchými postupy bez složitějších vyhodnocování. Je

možné použít např. zvukoměru s oktávovými filtry. (Výsledek získaný přehledovým měřením se od skutečné hodnoty liší o méně jak 5 dB).

2.4 Doba a délka měření

Významnou roli při hodnocení akustických imisí jak v pracovním tak mimopracovním prostředí má volba doby a délky měření. Měření se provádí vždy v době, která je typická pro hlukovou situaci v dané lokalitě. Délka měření se volí v závislosti na povaze hluku a na požadované přesnosti.

2.4.1 V pracovním prostředí

Při podrobném měření ustáleného hluku se měří všechny veličiny hodnotící akustické imise desetkrát v intervalech rovnoměrně rozložených v průběhu směny, při běžném měření ustáleného hluku se měří alespoň desetkrát hladina $L_{Aeq,T}$ a třikrát hladina $L_{P,Af}$ a při přehledovém měření ustáleného hluku alespoň třikrát $L_{Aeq,T}$. Při podrobném měření proměnného hluku se doporučuje opakovat v průběhu směny expozici hluku pětkrát, pro běžná měření třikrát a přehledová měření jedenkrát. Přitom celková doba měření, tj. součet dob trvání měřicích intervalů, musí být při podrobném měření nejméně 10% doby trvání směny, při běžném měření 3% a přehledovém měření 1% doby trvání směny. Údaje musí být doplněny dobou pobytu pracovníků na jednotlivých pracovních místech nebo v pracovních prostorech.

2.4.2 V mimopracovním prostředí

Doba měření se volí tak, aby odpovídala průměrné situaci. V místech, kde je rozhodujícím zdrojem hluku silniční doprava, volí se měření zpravidla v době mezi 7. a 14. hodinou. Délka časového intervalu je závislá na hustotě dopravy. Při intenzivním provozu se zpravidla volí časový interval 10 minut, při malém počtu projíždějících vozidel 20 minut a déle. V době měření musí projet minimálně 50 vozidel a být zastoupeny všechny druhy dopravních prostředků, které se v dané lokalitě vyskytují.

2.4.3 Hluk z leteckého provozu

Měření hluku z leteckého provozu se provádí 24 hodin zpravidla v charakteristickém dni, který je základem pro vyhodnocení měření, přičemž za charakteristický den se považuje takový den, v němž letecký provoz dosahuje tzv. směrodatné hustoty.

2.5 Povaha hluku

Podle časového průběhu hladin akustického tlaku A , L_{pA} , lze rozdělit hluk na:

- ustálený
- proměnný:
 - neimpulzního charakteru
 - impulzního charakteru (s opakovací frekvencí menší než 20 Hz nebo větší než 20 Hz)

2.5.1 Ustálený hluk

V případě ustáleného hluku se hladina akustického tlaku A mění nejvýše v rozmezí 5 dB. Ustálený hluk trvá dlouhodobě v porovnání s intervalem měření a doba jeho trvání je porovnatelná s délkou pracovní doby, délkou pobytu osob v uvažovaném prostoru, časovým úsekem dne apod.

2.5.2 Proměnný hluk

Za proměnný považujeme hluk, jehož hladina akustického tlaku A se ve všech naznačených časových úsecích mění opakovaně v rozmezí větším než 5 dB. Kolísavý hluk se vyznačuje pozvolnými a plynulými změnami, přerušovaný hluk náhlými a výraznými změnami.

2.5.3 Určení povahy hluku

Zjištění, zda jde o hluk ustálený nebo proměnný, se provádí měřením průběhu L_{pA} v čase při dynamické charakteristice F (Fast). Rozčlenění hladin akustického tlaku A v čase se nejnázne zjistí čtením na zvukoměru v intervalech přiměřených změnám hladin, nebo přesněji časovým záznamem L_{pA} .

Zjištění, zda jde o hluk impulzního charakteru, se provede srovnáním měření hladiny akustického tlaku A , L_{AI} při časové konstantě I (Impulse) a L_{AS} při časové konstantě S . Je-li roz-

díl mezi naměřenými hodnotami větší než 5 dB , považuje se hluk za impulzní. Ukáže-li měření, že jde o hluk impulzní, určí se současně, zda je opakovací frekvence větší nebo menší než 20 Hz.

2.5.4 Kmitočtové složení hluku

Z hlediska kmitočtového složení lze ustálený hluk rozdělit na hluk:

- se spojitým spektrem
- se smíšeným spektrem:
 - s převažující spojitou částí
 - s převažujícími diskrétními složkami
 - tónového charakteru
 - vysokofrekvenční

Kmitočtové složení ustáleného hluku se spojitým nebo smíšeným spektrem s převažující spojitou částí je dostatečně charakterizováno hladinou akustického tlaku v oktávních pásmech. Spektrum s převažujícími diskrétními složkami se zjišťuje úzkopásmovými analyzátory se šířkou pásma nejvýše 1/3 oktávy.

2.5.5 Tónový charakter (tónovost) zvuku

Zejména při posuzování hluku na pracovištích s náročnější duševní prací je třeba znát, zda hluk má tónový charakter či nikoliv. Tónový charakter hluku lze zjistit subjektivním posouzením (zkušenými experimentátory) nebo přesněji pomocí úzkopásmové frekvenční analýzy.

Tónovost hluku se projeví výraznými čárovými složkami, jejichž kmitočty jsou celistvým násobkem základního kmitočtu a jejichž hladiny akustického tlaku jsou o více než 5 dB vyšší než v sousedních kmitočtových pásmech. Hluk s výraznými složkami v oblasti kmitočtů vyšších než 8 kHz označujeme jako vysokofrekvenční.

2.6 Hluk pozadí

Za hluk pozadí považujeme údaj na zvukoměru, který není vyvolán měřeným hlukem. Výsledky měření a hodnocení budou tím spolehlivější, čím bude větší odstup měřeného hluku od hluku pozadí. Nemůžeme-li během měření pozadí zcela vyloučit zdroj hluku (např. při měření hlukové charakteristiky silniční komunikace), považujeme za hluk pozadí procentní (distribuční) hladinu akustického tlaku $L_{A,99}$.

Hluk pozadí je třeba měřit před vlastním měřením hluku na stejných měřicích místech a ve stejných veličinách jako měřený hluk. Je-li rozdíl mezi naměřeným hlukem a hlukem pozadí větší než 10 dB, neovlivňuje hluk pozadí měřenou hodnotu. Je-li zjištěný rozdíl od 4 dB do 6 dB, odečtou se od změřených hladin hluku 2 dB, je-li rozdíl od 6 do 9 dB, odečte se od změřených hladin hluku 1 dB. Zjistí-li se hluk pozadí o méně než 4 dB nižší než měřený hluk, nelze měření hodnotit. V tomto případě je nutné měření opakovat, ale zajistit přitom takové podmínky, aby rozdíl hladiny měřeného hluku a hladiny hluku pozadí byl větší než 4 dB.

2.7 Fyzikální vlastnosti prostředí

Výsledky měření hlukové situace, zvláště ve venkovním prostředí mohou být ovlivněny řadou fyzikálních faktorů, které je třeba brát v úvahu při zpracování výsledků měření.

Každé měření hluku ve venkovním prostoru musí být doplněno nejméně měřením rychlosti proudění vzduchu a měřením teploty. Při rychlostech větru 3 ms^{-1} až 5 ms^{-1} je třeba provádět korekce naměřených hodnot s ohledem na rychlost proudění vzduchu a na druh použitého krytu stanovené výrobcem přístroje. Při rychlostech větru nad 5 ms^{-1} nelze měření provádět. Je-li rychlost větru do 3 ms^{-1} , užije se kryt proti větru, který prakticky neovlivní vlastnosti měřicích mikrofonů.

Dále je třeba zabezpečit, aby měřicí mikrofon nebyl při měření vystaven otřesům, vibracím, magnetickým nebo elektrickým polím, nadměrné teplotě nebo chladu, nadměrné vlhkosti nebo jiným vlivům, které by ovlivnily vlastnosti měřicího mikrofonu a tím znehodnotily měřené hodnoty. Výrobce mikrofonu deklaruje zpravidla povolený rozsah fyzikálních vlivů a uvádí je v technické dokumentaci.

2.8 Akustické imise

2.8.1 Maximální přípustné hodnoty akustických imisí

Maximální dovolené hodnoty veličin hodnotících akustické imise jsou uvedeny v příloze č. 41 Vyhlášky č. 13/1977 Sb. o nejvyšších přípustných hodnotách hluku a vibrací vydané jako Hygienický předpis.

Maximální přípustná velikost hodnotící hladiny $L_{p,m}$ je určena jako součet základní hladiny L_z a korekce K :

$$L_{p,m} = L_z + K \quad (12)$$

Velikost základní hladiny a velikost korekce je stanovena s ohledem na:

v pracovním prostředí:

- druh vykonávané činnosti
- dobu trvání hluku
- povahu hluku

v chráněných prostorech:

- zda jde o vnitřní nebo vnější zdroj hluku
- využití prostoru
- povahu hluku
- denní dobu

ve venkovním prostoru:

- využití prostoru
- místní podmínky
- povahu hluku
- denní dobu

Hodnocení hluku se provádí porovnáním hodnot zjištěných měření s nejvyššími přípustnými hladinami.

2.9 Záznam o měření akustických imisí

Při každém měření hluku v místech pobytu osob v pracovním i mimopracovním prostředí je důležité vhodným způsobem zaznamenat podmínky měření i dostatečné množství naměřených údajů. Na základě záznamu je pak vypracován protokol o měření.

2.9.1 Minimální požadavky na záznam o měření akustických imisí

V záznamu nesmí chybět:

- název, místo, datum měření, jména osob provádějících měření
- seznam použitých norem nebo předpisů
- seznam použitých měřicích přístrojů
- charakteristika zdrojů hluku
- charakteristika prostoru měření včetně rozměru, akustických úprav, cest šíření hluku apod.
- popis měřicích míst
- charakter zvukového pole
- údaje o povaze hlukového signálu
- hluk pozadí
- doba měření, doba trvání hluku, doba měřicích intervalů
- fyzikální a atmosférické podmínky při měření

2.10 Omezování imisí hluku

K ochraně před nepříznivými účinky hluku v místech pobytu osob se musí provádět technická, organizační a další opatření k tomu, aby na těchto místech byl omezen hluk na nejmenší možnou míru, zvláště pak aby nebyly překročeny nejvyšší přípustné hodnoty stanovené Vyhláškou č. 13/1977 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. Podle této vyhlášky jsou občané i organizace povinni zabezpečit, aby se při provozu zařízení i při konání jiných činností, při nichž může vzniknout hluk, zamezilo vzniku a šíření hluku. Zejména v noční době (od 22 hodin do 6 hodin) musí být omezena hlučnost projevu osob ve všech místech jejich pobytu. Reprodukční zařízení (hudební nástroje, rozhlasové a

televizní přijímače) mohou být používána jen takovým způsobem, aby nezáčastněné osoby nebyly rušeny. Ve veřejných dopravních prostředcích je dovoleno používat reprodukční zařízení jen tehdy, pokud hladina akustického tlaku A uvnitř dopravního prostředku nepřesahuje nejvyšší přípustné hodnoty. Při územním plánování je nutné dbát na to, aby před hlukem byly chráněny stavby pro bydlení a stavby občanského vybavení, zejména zdravotnická zařízení, vědecká pracoviště, školy a jiná společenská zařízení. Organizace jsou povinny zajišťovat provoz závodů, letišť a pozemních komunikací tak, aby nebyly překročeny hladiny hluku, podle nichž bylo rozhodnuto o urbanistickém řešení a využití území. Pokud nelze technickými ani organizačními prostředky zabezpečit, že nebudou překračovány nejvyšší přípustné hodnoty hluku na pracovních místech, musí organizace poskytnout osobní ochranné pomůcky k ochraně sluchu a pracovníci jsou povinni těchto prostředků na pracovištích používat. Další náhradní opatření ke zmírnění škodlivých vlivů hluku mohou uložit organizaci orgány hygienické služby. [2]

3 ZÁSTĚNY A ZVUKOIZOLAČNÍ KRYTY

3.1 Zástěny

Zástěna je rovinná či zakřivená plocha vložená do cesty šířícímu se hluku mezi zdroj a objekt před hlukem chráněný (P). Jestliže se v přímé cestě šíření zvuku od zdroje nacházejí překážky, mají dodatečný stínící účinek tím větší, čím vyšší je překážka a čím blíže se zdroj zvuku Z nebo místo imise P k této překážce nachází. Za překážkou se vytváří zvukový stín, do kterého se zvuk dostává pouze ohybem kolem hran překážky. Tím se hladina zvuku snižuje o vložný útlum D . Útlum je tím větší, čím je vyšší kmitočet a čím větší je rozdíl drah δ .

3.1.1 Účinky zástěn

Pro tenké překážky (zástěny) platí (obr.5a):

$$\delta = a + b - (d_1 + d_2) \quad (13)$$

nebo

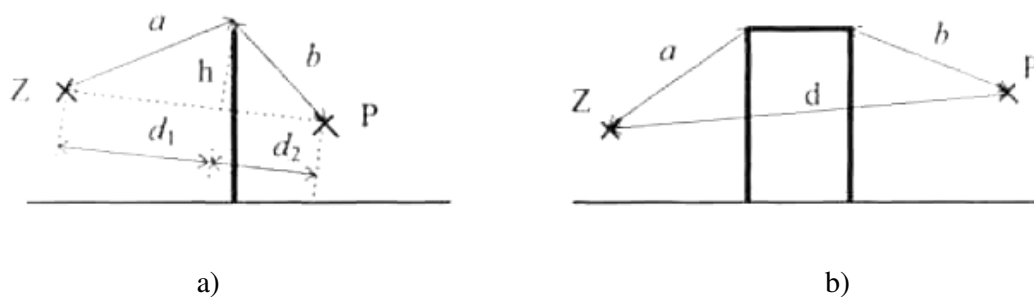
$$\delta = \sqrt{d_1^2 + h^2} - d_1 + \sqrt{d_2^2 + h^2} - d_2 \quad (14)$$

Je-li překážkou budova, zemní val apod.(obr.5b), pak

$$\delta = a + c + b - d \quad (15)$$

Vložný útlum D pro bodový zdroj v obou případech vypočítáme podle vztahu:

$$D = 10 \log(0.12 f \delta + 3) \text{ dB} \quad (16)$$

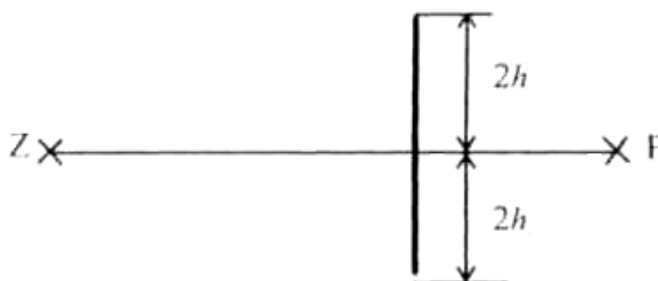


Obr. 5. Zástěna tenká a ve formě budovy, zemního valu apod.

Je možno najít celou řadu dalších rovnic pro výpočet vložného útlumu, které uvádí různí autoři.

3.1.2 Realizace zástěn

Zástěna musí být dostatečně dlouhá, aby nedocházelo k ohybu zvukových vln kolem hran. Dráhový rozdíl bočně kolem přepážky má být min. 5δ , resp. $2h$ na každou stranu od spojnice zdroje hluku Z a chráněného místa P (obr.6).



Obr. 6. Model ideální realizace zástěny.

- zástěna musí mít stupeň vzduchové neprůzvučnosti podstatně větší než činí vložný útlum zástěny
- zástěna musí být, alespoň na straně přivrácené ke zdroji hluku, obložena zvuk pohlcujícím materiálem, aby nenastalo před ní vlivem odrazů zvýšení hladiny hluku
- zástěna musí být protažena až k podlaze resp. terénu, neboť jakékoliv otvory v zástěně zhoršují její účinek
- použití zástěn je účelné zejména tam, kde je třeba dosáhnout snížení hladiny hluku v blízkosti zdroje nebo omezit vyzařování přímého hluku určitým směrem

- vzhledem k závislosti účinku zástěn na jejich velikost (poměru rozměrů a vlnové délky zvuku) je možno očekávat účinek zeslabení zástěnou o 5 dB až 10 dB jen pro střední a vyšší kmitočty
- obložením zástěny obkladem pohlcujícím zvuk je možno dosáhnout ještě zlepšení účinku zeslabení až o 5 dB

3.2 Zvukoizolační kryty

Krytování zdrojů hluku je jedním z možných a efektivních způsobů snižování hluku zdrojů na žádanou úroveň, např. na hygienicky přípustné hodnoty. Aplikace však vyžaduje řešit otázku hodnocení účinnosti tohoto opatření jak po stránce akustické, tak ekonomické.

Zvukoizolační kryt v praxi představuje konstrukci, která ve většině případů musí vedle akustických parametrů splňovat i náročné požadavky na bezpečný a spolehlivý chod zakrytého zařízení. Dále nesmí omezovat technologický provoz zakrytovaného zařízení. Z toho vyplývá, že kryt musí být ve většině případů opatřen funkčními otvory, pro vstup a výstup zpracovávaného materiálu, např. kryt pak jako celek představuje tedy složenou konstrukci skládající se z jednotlivých ploch včetně otvorů a štěrbin. Jednotlivé plochy mohou mít velmi rozdílné zvukoizolační vlastnosti. Akustická kvalita krytu je určena dvěma parametry, stupněm vzduchové neprůzvučnosti R a činitelem zvukové pohltivosti α . Obě hodnoty bývají uvedeny v katalogu používaných prvků. V případě speciálního složení stěny lze získat oba parametry měřením v laboratořích specializovaných pracovišť.

3.2.1 Zvukoizolační účinek

Znalost výše uvedených parametrů je nutná pro stanovení míry zvukoizolačního účinku krytu, tj. vložného útlumu D . Vložný útlum je definován jako rozdíl hladin akustického tlaku v daném místě pro zdroj hluku bez krytu a s krytem. Hodnotu vložného útlumu lze stanovit ve frekvenčních pásmech výpočtem ze vztahu

$$D = 10 \log \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i S_i}{\sum_{i=1}^n \tau_i S_i} \right] \quad (17)$$

D vložný útlum zvukoizolačního krytu [dB]

τ_i	činitel průzvučnosti i-té plochy	
ε_i	činitel přeměny akustické energie i-té plochy	
S_i	plošný obsah i-té plochy	[m]
n	počet ploch tvořících stěny krytu, které mají různou akustickou kvalitu	

Tento vztah platí za předpokladu, že akustická energie se šíří od zdroje převážně vzduchem (kryt není zdrojem buzen a nevyzařuje).

$$\tau_i = 10^{-0,1R} \quad (18)$$

kde R je stupeň vzduchové neprůzvučnosti.

$$\varepsilon = \alpha - \tau \quad (19)$$

kde α je činitel zvukové pohltivosti.

Pro otvor nebo štěrbinu, který není zatlumen, je $\tau_i = 1$ a $\varepsilon_i = 0$ a silně tak ovlivní výslednou hodnotu vložného útlumu D krytu. Například pro plošný obsah otvoru, který je pouze 0,1% celkového plošného obsahu plochy stěn krytu, je pokles vložného útlumu oproti stupni neprůzvučnosti stěny na vysokých kmitočtech 30 dB až 35 dB, pro kryt s $\alpha \approx 0$. Každá netěsnost v provedení krytu pak zcela jednoznačně limituje zvukoizolační účinek krytu, a to i v případě, že $\alpha > 0$, kde sice dochází k menším poklesům D vlivem otvorů ve stěnách krytu, ale i zde je tento vliv závažný.

3.2.2 Realizace zvukoizolačních krytů

Obecně platí dva základní poznatky, které by měly být respektovány při návrhu zvukoizolačních krytů:

- stupeň vzduchové neprůzvučnosti stěn krytu může být ekonomicky využit pouze za předpokladu, že vnitřní stěny krytu jsou pohltivě obloženy ($\alpha > 0,5$);
- zvukoizolační účinek krytu je limitován netěsnostmi (škvírami) a otvory v konstrukci krytu. Pro zvýšení vložného útlumu je proto nezbytné odstranit netěsnosti a nutné otvory opatřit tlumiči hluku.

L_{p_1}	hladina akustického tlaku vně kabiny	[dB]
R_j	stupeň neprůzvučnosti j-tého prvku	[dB]
A	ekvivalentní pohltivá plocha uvnitř kabiny	[m ²]
n	počet prvků s rozdílnou neprůzvučností	

Výpočet se provádí pro oktávová pásma 125 Hz až 8000 Hz. Pro výpočet je nezbytná znalost kmitočtové závislosti stupně neprůzvučnosti jednotlivých částí konstrukce. Z hodnot L_{p_2} se vypočte hladina tlaku A .

3.4 Polouzavřené kryty

3.4.1 Účinky polouzavřených krytů

Polouzavřený kryt použijeme, je-li třeba omezit vyzářování hluku ze zdroje do celého okolního prostoru, příp. je-li třeba určité místo chránit před dopadem hluku z celého okolního prostoru (ze všech směrů).

Účinek polouzavřeného krytu kolem zdroje se projeví v celém prostoru vně krytu. Projeví se pro všechny osoby vyjma těch, jež jsou uvnitř krytu. Účinek polouzavřeného krytu kolem chráněného místa se naopak projeví pouze pro prostor a osoby uvnitř krytu.

Uvnitř krytu kolem zdroje se vytvoří vyšší hladina hluku způsobená zvětšením hustoty akustické energie odrazy zvuku od stěn krytu. Tento negativní účinek je nutno kompenzovat zvuk pohlcujícím obkladem uvnitř krytu.

Výpočet velikosti stínícího účinku krytu je značně komplikovaný. Celkové snížení hluku vně krytu je nepřímo úměrné prostorovému úhlu otevření krytu Ω [sr], který uvažujeme vzhledem ke středu zdroje hluku uvnitř krytu.

$$D = 10 \log \left(\frac{\pi}{\Omega} \right) \quad (21)$$

kde $\Omega = \arcsin(\sin \beta \cdot \sin \chi)$, $\beta = \arctg \frac{b}{2t}$, $\chi = \arctg \frac{h}{2t}$

přičemž b je šířka otvoru, h je výška otvoru a t je vzdálenost otvoru od zdroje.

3.4.2 Realizace polouzavřených krytů

Při respektování výše uvedených zásad pro konstrukci polouzavřených krytů lze očekávat snížení hladiny hluku vlivem krytu v rozmezí 15 dB až 25 dB v rozsahu středních kmitočtů.

Při použití polouzavřeného krytu je možno méně obkládat strop a stěny pohlcujícím obkladem než při použití zástěn.

Nežádoucí vliv otvorů je třeba omezit zástěnou před otvorem, která přesahuje otvor. Kryt musí být protažen až k podlaze nebo zesponu uzavřen. Stojí-li kryt blízko stěny, je vhodné jeho otvor orientovat proti této stěně a tuto obložit zvuk pohlcujícím obkladem. [2]

4 AKUSTICKÉ VLASTNOSTI POHLTIVÝCH MATERIÁLŮ A JEJICH APLIKACE V PRAXI

Pohlcování zvukové energie a její přeměna v jinou, nejčastěji tepelnou energii, je významným prostředkem k řešení akustických problémů uzavřených prostorů. V oblasti prostorové akustiky se využívá pohltivosti k úpravě doby dozvuku v prostorech a místnostech pro kulturní účely; v koncertních sálech, divadlech, kinosálech, konferenčních místnostech apod., aby co nejdokonaleji sloužily svému účelu. Pro tuto oblast použití se nejlépe hodí akustické materiály a konstrukce úzkopásmové s frekvenční charakteristikou zvukové pohltivosti ve tvaru rezonanční křivky. Technická akustika využívá zvukopohltivých materiálů ke snížení hladiny akustického tlaku v prostorech, kde je umístěn zdroj hluku nebo do kterých hluk proniká odjinud. Jedná se o průmyslové haly, sportovní haly, kryté plovárny, telefonní ústředny, výpočetní stanice, ale také lékařské vyšetřovny apod. Pro tyto účely jsou vhodné materiály a konstrukce se širokopásmovým účinkem. Akustické materiály mohou být účinné v široké oblasti slyšitelného spektra. Závisí to na jejich struktuře, tloušťce, povrchové úpravě, na typu konstrukce a na montáži.

Z hlediska uspořádání a typické frekvenční závislosti činitele zvukové pohltivosti je možné rozdělit materiály a konstrukce pro absorpci zvuku na:

materiály:

- pórovité
- vláknité

konstrukce:

- pohltivé obklady
- konstrukce typu Helmholtzových rezonátorů
- kmitající membrány a desky
- akustická tělesa

4.1 Vlastnosti materiálů pohlcujících zvuk

Materiály pohlcující zvuk mají převážně porézní strukturu. Jsou to látky pórovité nebo vláknité, v jejichž objemu se nacházejí póry vyplněné vzduchem a jejichž povrchová úprava umožňuje pronikání zvukové vlny ze vzduchu dovnitř pohltivého materiálu.

Aplikací pohltivého materiálu nebo pohltivé konstrukce se podaří snížit zvukovou energii odrážející se od stropu, podlahy a stěn v místnosti a tím také hladinu akustického tlaku v tomto prostoru. Klasickými pórovitými materiály jsou např. polyuretanové pěny (molitan), které se hodí k použití především v těch prostorech, kde není nebezpečí požáru. Vláknité materiály jsou tvořeny z mikrovláken ze skla, minerální plsti apod. a používají se tam, kde musí odolávat vysokým teplotám.

V porézních látkách dochází k nevratné přeměně zvukové energie v tepelnou energii třemi základními způsoby:

- třením
- relaxací akustického tlaku
- nepružnou deformací.

K přeměně akustické energie vlivem tření dochází při pohybu částic vzduchu póry pohltivého materiálu. Množství pohlcené energie závisí na rozměrech a uspořádání pórů a na tloušťce materiálu. Jelikož styčné plochy mezi částicemi vzduchu a materiálem jsou u vláknitých a pórovitých materiálů poměrně velké, dochází tak ke značné přeměně kinetické energie zvukových vln v tepelnou energii.

K relaxaci akustického tlaku v daném místě materiálu může dojít různými způsoby. Šíří-li se zvuková vlna látkou, nastane v místech zhuštění částic vzduchu v pórech zvýšení akustického tlaku a tím také dojde v těchto místech ke zvýšení teploty. Jelikož soustava pórů není od kostry materiálu tepelně izolována, přejde teplo ze vzduchu do kostry. Přechod tepla má za následek snížení teploty vzduchu a tím také pokles tlaku, jemuž odpovídá snížení potenciální energie zvukové vlny. Jiný způsob relaxace tlaku nastává při šíření zvuku kostrou materiálu. V místech zmenšení průřezu kostry nastane zvýšení teploty a jestliže je látka dobrým vodičem tepla, dojde k vyrovnání teplot s okolím a tím opět k relaxaci tlaku.

K přeměně zvukové energie vlivem nepružné deformace dochází u látek, které vykazují tzv. nepružnou hysterezi. Stlačíme-li takovou látku určitou silou, nevrátí se tato látka do

původního stavu, přestane-li síla působit. Práce vynaložená na deformaci je tedy větší než práce získaná pružností tělesa při návratu do původního tvaru a jejich rozdíl představuje úbytek zvukové energie vlivem nedokonalé pružnosti.

Základními fyzikálními vlastnostmi pórovitých materiálů, které ovlivňují jejich pohltivé vlastnosti, jsou:

- poréznost
- měrná akustická impedance
- odpor proti proudění vzduchu
- činitel struktury
- činitel udávající typ termodynamických pochodů v pórech materiálu

Poréznost Y je definována jako poměr objemu pórů V_p k celkovému objemu materiálu V_c , tj.:

$$Y = \frac{V_p}{V_c} \quad (22)$$

Za pórovité se považují látky, u kterých je poréznost minimálně 60%.

Měrná akustická impedance (charakteristická impedance) - je definována jako poměr akustického tlaku a akustické rychlosti částic na vstupní ploše materiálu na nějž dopadá rovinná zvuková vlna kolmo:

$$Z_s = \frac{p}{v} \quad (23)$$

Z_s	měrná akustická impedance materiálu	[Pa s m ⁻¹]
p	akustický tlak	[Pa]
v	akustická rychlost	[m s ⁻¹]

Na povrchu materiálu není akustický tlak a akustická rychlost ve fázi. Měrná akustická impedance je pak komplexní číslo vyjádřené vztahem:

$$Z_s = r + ix \quad (24)$$

r	reálná složka měrné akustické impedance zvaná též měrný akustický odpor nebo činný odpor	[Pa s m ⁻¹]
-----	--	-------------------------

x imaginární složka měrné akustické impedance, někdy nazývaná měrná akustická reaktance [Pa s m⁻¹]

Odpor proti proudění vzduchu je definován jako poměr rozdílu tlaků vzduchu před a za vrstvou porézního materiálu a objemové rychlosti proudění vzduchu do vrstvy:

$$R = \frac{\Delta p}{q} \quad (25)$$

R odpor proti proudění vzduchu [Pa s m⁻³]

Δp rozdíl akustického tlaku před a za vrstvou akustického materiálu [Pa]

$q = uS$ objemová rychlost vzduchu proudícího do vrstvy [m³ s⁻¹]

u rychlost proudění vzduchu do vrstvy [m s⁻¹]

S velikost plochy kolmé na směr proudění [m²]

Odpor materiálu proti proudění vzduchu závisí na průměru vláken, na jejich orientaci a na pórovitosti materiálu.

Činitel struktury, který je vždy větší než 1, udává vliv pórů v kostře materiálu na akustické vlastnosti. Závisí na vzájemném uspořádání kostry látky a pórů.

Činitel udávající typ termodynamických pochodů v pórech materiálu n udává, zda stlačování a zředování vzduchu při šíření zvuku póry materiálu probíhá adiabaticky, izotermicky nebo polytropicky. Při velmi nízkých frekvencích, kdy je dostatek času pro výměnu tepla mezi kostrou materiálu a celkovým objemem vzduchu v dutinách, probíhá děj izotermicky, tj. $n = 1$. Při vysokých kmitočtech se akustický tlak velmi rychle mění a doba jedné periody je pro výměnu tepla příliš krátká. Zředování a stlačování vzduchu v pórech probíhá adiabaticky, tj. $n = 1,4$. V úzkém pásmu středně vysokých frekvencí je děj stlačování a zředování vzduchu polytropicky a hodnota n se pohybuje mezi 1 až 1,4.

4.2 Činitel zvukové pohltivosti

Schopnost materiálu nebo nějakého tělesa pohlcovat zvuk a účinnost tohoto pohlcování vyjadřuje činitel zvukové pohltivosti α , schopnost těles odrazet zvuk vyjadřuje činitel zvukové odrazivosti β . Jejich velikost se může pohybovat od 0 do 1.

Odráží-li stěna dokonale dopadající zvukovou vlnu, je $\alpha = 0$, $\beta = 1$, je-li všechna dopadající energie pohlcena, je $\alpha = 1$, $\beta = 0$. Za dobře pohltivé považujeme materiály, pro něž α je vyšší než 0,60. Jsou to materiály, jejichž vnitřní struktura je přizpůsobena jak přeměně akustické energie v teplo, tak přenosu energie ze vzduchu do pohltivého materiálu, tj. materiály, jejichž činný odpor (reálná složka měrné akustické impedance) se blíží vlnovému odporu vzduchu $\rho_0 c$. Činitel zvukové pohltivosti je závislý na frekvenci a na směru dopadu zvukové vlny. Při kolmém dopadu zvukové vlny jej označujeme α_N a měříme v interferometru metodou analýzy stojatých vln, pro všerozměrný dopad se označuje α_s (Sabínův) a měření se provádí v dozvukové komoře. Přednostně se měří a uvádí činitel pohltivosti pro střední frekvence třetinooktávových pásem v oblasti 125 Hz až 6300 Hz.

Známe-li měrnou akustickou impedanci materiálu, je možné určit α_N pro kolmý dopad zvuku přibližně výpočtem podle vztahu:

$$\alpha_N = \frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{4} \left(\frac{r}{\rho_0 c} + \frac{\rho_0 c}{r} \right)} \quad (26)$$

r reálná složka měrné akustické impedance materiálu

$\rho_0 c = 400$ vlnový odpor vzduchu za normálních podmínek [Pa s m⁻¹]

Je zřejmé, že $\alpha_N = 1$ pro $r = \rho_0 c$

Pro všesměrový dopad můžeme reprezentovat dopad zvukové vlny úhlem $\vartheta = 45^\circ$ a přibližně počítat α_s podle upraveného vztahu:

$$\alpha_s = \frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{4} \left(\frac{r}{\rho_0 c \sqrt{2}} + \frac{\rho_0 c \sqrt{2}}{r} \right)} \quad (27)$$

Při aplikaci pohltivých materiálů v praxi však dáváme vždy přednost změřeným výsledkům.

4.3 Pohltivé konstrukce

Počátek vývoje akustických konstrukcí pro pohlcování zvuku spadá do 20. století. Byl vynucen moderní architekturou používající jednoduchých tvarů a strohého pojetí interiérů. Základním materiálem bylo dřevo a tkaniny, které se používají i nyní vedle kovů a plastických hmot. Předchůdcem pohltivých konstrukcí založených na rezonančním principu byly zazděné vázy, částečně tlumené popelem nebo konopím. Používaly se již v minulém století k řešení akustiky chrámů a kostelů. Vázy různých tvarů byly nalezeny ve skandinávských kostelích postavených v minulém století. V Maďarsku ve městě Pécs byla v mešitě nalezena váza s objemem dutiny $1,5 \text{ dm}^3$, s délkou hrdla $1,6 \text{ cm}$ a s průměrem hrdla $4,2 \text{ cm}$. Její rezonanční kmitočet 243 Hz leží u dolního okraje spektra lidské řeči.

4.3.1 Pohltivé obklady

Použití porézních pohltivých materiálů jako obkladů je možné v praxi realizovat dvěma způsoby. V prvním případě je látka upevněna přímo na pevnou stěnu, v druhém případě se mezi stěnou a pohltivým materiálem nachází vzduchový polštář. Pohltivost obkladu bez vzduchové mezery je nízká v oblasti nízkých kmitočtů a směrem k vyšším kmitočtům roste a dosahuje určité maximální hodnoty závislé na poréznosti použitého materiálu. To, jak látka pohlcuje zvuk v oblasti nízkých kmitočtů, závisí na její tloušťce. Vztah

$$h = \frac{1}{10} \cdot \frac{c}{f_m} \quad (28)$$

h	tloušťka vrstvy	[m]
c	rychlost zvuku ve vzduchu	[m s ⁻¹]

přibližně vyjadřuje tloušťku vrstvy, při níž se materiál stává účinným nad kmitočtem f_m , tj. kde činitel pohltivosti α vzrůstá nad 60%. Ze vztahu (28) je zřejmé, že pohlcování nízkých kmitočtů by vyžadovalo materiály velké tloušťky. Je nevýhodné klást vrstvu materiálu přímo na stěnu, neboť tam je akustická rychlost částic vzduchu nulová a na její velikosti závisí přeměna akustické energie v energii tepelnou. S rostoucí vzdáleností od stěny rychlost stoupá a maximální hodnoty dosáhne v kmitně vzdálené o čtvrtinu vlnové délky od stěny. Kmitočtová charakteristika činitele zvukové pohltivosti pak bude mít maxima pro liché násobky čtvrtiny vlnové délky rovné vzdálenosti látky od pevné stěny. To jsou případy, kdy se látka nachází v kmitně akustické rychlosti. Popsaný účinek vzduchové vrstvy se

projeví tehdy, je-li porézní obkladová deska upevněna tak, aby sama nemohla kmitat, nebo je-li porézní látka tak ohybově poddajná, že ohybové kmity nepřicházejí v úvahu.

V převážné míře mají pohltivé materiály drobný, ke znečištění a poškození náchylný povrch. Proto se překrývají ochrannou vrstvou, která však nesmí nepříznivě ovlivňovat zvukopohltivý účinek. K překrytí se používají tkaniny, síťe nebo děrované desky. Při použití děrovaných desek (plechů nebo dřevovláknitých desek) nesmí činitel děrování ε , t.j. poměr velikosti plochy otvorů a celkové plochy desek překročit 20%.

4.3.2 Pohltivé konstrukce založené na rezonančním principu

Dopadá-li na určitou rezonanční soustavu zvuková vlna, uvede ji do vynuceného kmitání, přičemž amplituda kmitů bude maximální v rezonanci. Při rezonanci je v soustavě nashromážděno co největší množství zvukové energie. Má-li rezonanční soustava účinně pohlcovat zvuk, musí být dostatečně tlumena, aby co největší množství nashromážděné zvukové energie bylo přeměněno v teplo.

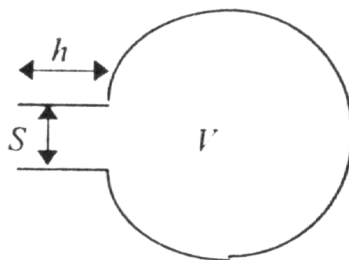
Závislost činitele zvukové pohltivosti na kmitočtu vykazuje u rezonančních soustav vždy maximum na vlastním kmitočtu soustavy. V praxi se používají dva typy pohltivých konstrukcí založených na rezonančním principu:

- konstrukce typu Helmholtzových rezonátorů
- kmitající membrány a desky

Dále k těmto konstrukcím patří akustická tělesa a absorpční tlumiče.

4.3.2.1 Pohltivá konstrukce typu Helmholtzova rezonátoru

Helmholtzův rezonátor, schematicky znázorněný na obr. 7, je tvořen dutinou o objemu V , opatřenou hrdlem o průřezu S délky h . Do dutiny se vkládá pohltivý materiál.



Obr. 7. Schema Helmholtzova rezonátoru.

Vlastní kmitočet rezonátoru je dán vztahem:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{Vh'}} \quad (29)$$

h' korigovaná délka hrdla [m]

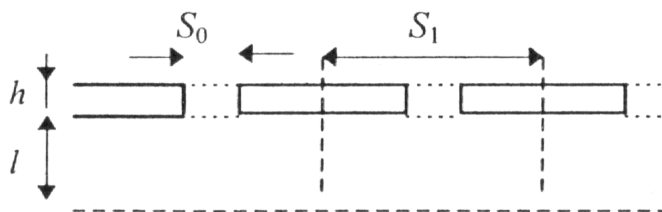
c rychlost šíření zvuku [m s⁻¹]

Korigovaná délka hrdla se vypočítá podle vztahu:

$$h' = h + \frac{8}{3\pi} d \quad (30)$$

d průměr hrdla rezonátoru [m]

Jednotlivě rozmístěné rezonátory se používají jen velmi zřídka. Mnohem častěji jsou využívány děrované panely, které se umísťují v určité vzdálenosti od stěny, takže ke každému otvoru v panelu přísluší určitá dutina, která spolu s otvorem tvoří Helmholtzův rezonátor:



Obr. 8. Helmholtzův rezonátor z děrovaných panelů.

Podle obr. 8 ke každému otvoru průřezu S_0 přísluší objem dutiny $V = S_1 \cdot l$, kterou vypl-

ňujeme pohltivým materiálem. Zavedeme-li činitel děrování $\varepsilon = \frac{S_0}{S_1}$, je vlastní frekvence

této soustavy dána výrazem:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{\left(h + \frac{\pi}{2} r_0\right) \cdot l}} \quad (31)$$

h výška otvoru v desce [m]

l vzdálenost desky od pevné stěny [m]

r_0 poloměr otvoru [m]

Vhodnou volbou činitele děrování, hloubkou otvorů, jejich poloměrů a vzdálenosti desky rezonátorů od pevné stěny můžeme rezonátor naladit na potřebnou frekvenci. Volba pohltivého materiálu pak ovlivňuje maximální hodnotu α při frekvenci f_0 a šířku pásma, ve které je soustava účinná.

4.3.2.2 Kmitající membrány a desky

V některých případech se používá pohltivého uspořádání, v němž je k pohlcování využito kmitání desek nebo membrán.

Pod pojmem kmitající membrána rozumíme tenkou desku nebo fólii, jejíž tuhost v ohybu je velmi malá ve srovnání s ohybovou tuhostí vzduchového polštáře mezi membránou a pevnou stěnou. Pak se neprojeví vliv upevnění na okrajích a membrána kmitá jako celek. Prostor mezi membránou a stěnou se vyplňuje porézním materiálem, který tlumí kmitání částic vzduchu a tím i kmity celé soustavy. Maxima pohltivosti se dosáhne při rezonanci, při níž je amplituda akustické rychlosti největší, tj. při frekvenci:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{m'l}} \quad (32)$$

c	rychlost šíření zvuku ve vzduchu	[m s ⁻¹]
ρ_0	hustota vzduchu za normálních podmínek	[kg m ⁻³]
m'	plošná hmotnost membrány	[kg m ⁻²]
l	tloušťka vzduchového polštáře	[m]

U desek, které mají podstatně větší hmotnost než membrány, se navíc uplatňuje ohybová tuhost, která značně převyšuje ohybovou tuhost vzduchového polštáře.

Ve srovnání s membránami se kromě základního kmitočtu uplatňují i kmitočty vyšších řádů. Vlastní frekvence desek je nižší než u membrán a je ovlivněna upnutím desky. Například pro desku, která je upevněna na okrajích platí:

$$f_{m,n} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0 c^2}{m'd} + \frac{\pi^4}{m'} \left[\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 \right] \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}} \quad (33)$$

E	modul pružnosti materiálu desky v tahu	[Pa]
h	tloušťka desky	[m]

μ	Poissonova konstanta	
d	tloušťka vzduchového polštáře	[m]
a, b	rozměry desky	[m]
m'	plošná hmotnost desky	[kg m ⁻²]
$m, n = 0, 1, 2, \dots$	řád vlastních kmitů desky	

Ostatní veličiny značí totéž co ve vztahu (32).

Potřebného tlumení kmitajících desek se dosáhne vyplněním vzduchového polštáře mezi deskou a stěnou vhodným pohltivým materiálem.

V praxi se někdy aplikují tříprvkové soustavy, které se realizují kombinací kmitající desky s fólií.

4.3.2.3 Akustická tělesa

Jedná se o prostorové pohltivé konstrukce, které se zavěšují v místnosti tak, aby nepřekážely osvětlovacím systémům nebo ventilačnímu zařízení. Vyrábějí se v různých geometrických tvarech, např. kužely, hranoly, rovnoběžnostěny apod. Mají poměrně vysokou akustickou účinnost, která se zvětšuje s rostoucí vzdáleností těles z důvodu poměrně snadné montáže a z důvodu možnosti jejich snadného udržování a možnosti opakovaného použití se těchto pohltivých konstrukcí používá hlavně ve sportovních halách, tělocvičnách, nádražních halách apod.

4.3.2.4 Absorpční tlumiče

Další významné uplatnění pohltivých materiálů je v absorpčních tlumičích. Bývají to části potrubí většího průřezu, v nichž je pohltivý materiál uspořádán tak, aby procházející zvuková energie přišla s ním do styku na maximální možné ploše. Na množství aplikovaného materiálu a jeho pohlcujících vlastnostech závisí útlumové vlastnosti tlumiče. Útlum se vyjadřuje počtem decibelů na 1 m délky. Absorpční tlumiče se používají v potrubí a kanálech pro ventilátory, kompresory apod.

4.4 Snižování hluku v uzavřených prostorech

Pohltivé konstrukce v různé realizaci používáme ke snižování nadměrného hluku v obytných, společenských, průmyslových i jiných prostorech. Je třeba si však vždy uvědomit, že pohltivým obkladem snížíme akustickou energii odražených vln, kdežto pole přímých zvukových vln, je-li zdroj hluku umístěn v uzavřeném prostoru zůstane beze změny.

Celková pohltivost prostoru A je frekvenčně závislá a je dána součtem akustického účinku všech ohraničujících ploch, tj.:

$$A = \sum \alpha_i S_i \quad (34)$$

A pohltivost prostoru [m²]

α_i činitel pohltivosti ohraničující plochy S_i

Celkovou pohltivost můžeme chápat také tak, jako by všechny ohraničující plochy měly stejný činitel zvukové pohltivosti $\alpha_{stř}$. Pak je možné vyjádřit pohltivost prostoru rovnicí:

$$A = \alpha_{stř} S \quad (35)$$

S celkový povrch všech ohraničujících ploch

Experimentální údaje ukazují, že v provozech průmyslového charakteru je $\alpha_{stř} = 0,12$ až $0,15$. Pro orientační výpočty předpokládáme $\alpha_{stř} = 0,15$.

Známe-li objem prostoru V a odhadneme-li $\alpha_{stř}$, můžeme pro praktické účely přibližně určit pohltivost prostoru ve vztahu:

$$A = \alpha_{stř} 6.6V^{\frac{2}{3}} \quad (36)$$

Přesněji lze vypočítat celkovou pohltivost prostoru pomocí Sabinova vztahu, známe-li dobu dozvuku.

Budeme-li zvyšovat činitel pohltivosti α u všech nebo alespoň u některých ohraničujících ploch, zvýšíme celkovou pohltivost prostoru. To se projeví poklesem původní hladiny akustického tlaku L_1 na hodnotu L_2 a platí:

$$\Delta L = L_1 - L_2 = 10 \log \frac{A_2}{A_1} \quad (37)$$

A_1 původní pohltivost prostoru [m²]

A_2 pohltivost prostoru po úpravě [m²]

Vztah (37) můžeme použít pro výpočet snížení hladiny akustického tlaku pro celý uzavřený prostor pouze v tom případě, je-li zdroj zvuku umístěn mimo tento prostor. Je-li zdroj zvuku uvnitř, pak vztah (37) platí pouze pro pole odražených vln, kdežto v poli přímých vln je zvýšení pohltivosti neúčinné. V praxi je možné dosáhnout snížení hladiny odraženého zvuku o 5 až 10 dB. Větší snížení je většinou již neefektivní, neboť pro poměrně malý přírůstek ΔL je zapotřebí velkého zvětšení pohltivosti. Obvykle je účelné upravit vhodným pohltivým materiálem 30% až 50% povrchu místnosti. [2]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CHARAKTERISTIKA VYBRANÝCH MATERIÁLŮ

5.1 Polyvinylchlorid (PVC)

5.1.1 Charakteristika PVC

Výrobky z PVC mají v současné době nepřebernou škálu podob a způsobů užití. Máme-li připomenout hygienickou nezávadnost PVC, uveďme jen, že je dosud užíván jako obalový materiál, přicházející do přímého styku s potravinami. Tento směr je však v poslední době opouštěn, neboť PVC je zde nahrazován lacinějšími materiály, nehledě na obtížnost čištění a separaci odpadu (obal z PVC má větší měrnou hustotu než voda, takže není možný obvyklý postup vyplavováním). Důležitou roli hraje PVC v lékařství, kde je s úspěchem používán již více než 50 let (infuzní sety, rukavice, inhalační masky, omyvatelné povrchy apod.). Velká množství PVC spotřebuje elektrotechnický průmysl. Těžko si lze představit náhradu kabelů a šňůr s PVC izolací, neodmyslitelné jsou též různé kryty a skříňky elektrických spotřebičů. Objemově největší a stále vzrůstající využití PVC je však ve stavebnictví. Do tohoto odvětví kromě potrubí, podlahovin, tapet, obkladů, fólií, profilů a jiných výrobků patří i plastová okna a dveře.

5.1.2 Výroba PVC

Výchozí látkou je ethylen, u něhož je substituován (nahrazen) chlórem jeden vodíkový atom za vzniku chlorethylenu neboli vinylchloridu. Ethylen je jedním z nejmasověji vyráběných produktů petrochemického průmyslu. Chlór pro průmyslové využití vzniká při výrobě hydroxidů alkalických kovů. PVC (polyvinylchlorid) je pak získáván emulzní nebo suspenzní polymerací vinylchloridu ve formě bílého porézního prášku. Průměrná relativní molekulová hmotnost PVC se pohybuje v rozmezí 80 až 100 tisíc, což odpovídá stupni polymerace mezi 10 až 15 tisíci molekul vinylchloridu na 1 molekulu PVC.

Pro výrobu okenních profilů se výhradně používá prášek PVC, získaný suspenzní polymerací. Původní polymerní surovina se ve fluidních jednotkách míchá s aditivou podle dalšího určení na tzv. "dry-blend", který může být přímo distribuován pro vytlačování profilů na dvoušnekových extrudérech nebo se v dalším technologickém procesu granuluje a ve formě granulátu je pak nabízen jednotlivým výrobcům. Kromě metody extruze jsou dalšími

způsoby zpracování PVC na různé výrobky vstřikování do forem nebo kalandrování (výroba fólií, desek, koženky). [6]

5.2 Extrudovaný polystyren (EPS)

5.2.1 Charakteristika extrudovaného polystyrenu

Základní surovinou je zpěňovatelný polystyren ve formě perlí, obsahujících zpravidla 6-7% pentanu jako nadouvadla. Tyto perle se vyrábějí suspenzní polymerací monomeru styrenu a jsou dodávány výrobcům pěnového polystyrenu v několika velikostních skupinách od 0,3 do 2,8 mm v závislosti na konkrétní aplikaci. Obě tyto látky se pro průmyslové využití vyrábějí z ropy.

Svojí pevností v tlaku, v tahu a ve smyku při minimální hmotnosti patří extrudovaný polystyren k nejvýkonnějším materiálům. Pevnost extrudovaného polystyrenu je využita mnoha způsoby:

- pevnost v tlaku – běžné desky vykazují pevnosti v rozmezí 70–200 kPa při 10% deformaci (tj. 7–20 tis. kg/m²) a je možno je navrhovat také pro vysoce zatížené konstrukce (terasy, průmyslové podlahy)
- pevnost v tahu – pevnosti v tahu, která je běžně přes 100 kPa, se využívá především u fasádních systémů. Díky takto vysokým hodnotám se nemusí používat zesílené speciální kotvení jako u některých jiných méně pevných materiálů
- pevnost ve smyku – tato vlastnost nabývá na důležitosti především se vzrůstající tloušťkou izolace (např. zamezování vzniku vln a nerovností na fasádě)

Pěnový polystyren neobsahuje a nikdy neobsahoval látky poškozující ozónovou vrstvu Země, známé jako freony.

5.2.2 Výroba extrudovaného polystyrenu

Výroba pěnového polystyrenu má tři fáze – předpěnění, meziuskladnění a výrobu bloků, desek, tvarovek, popřípadě pásů.

Zpěňovatelný polystyren se předpěňuje působením syté vodní páry. Během tohoto procesu zvětší perle dvacetkrát až padesátkrát svůj původní objem a uvnitř každé perle vznikne buněčná struktura.

Výsledná sypaná hmotnost, daná teplotou páry a dobou jejího působení na perle, musí být stejná jako požadovaná objemová hmotnost vyráběného extrudovaného polystyrenu. Ta se zpravidla pohybuje mezi 10 až 35 kg/m³ a má velký vliv na většinu vlastností konečného výrobku.

Během meziuskladnění v provzdušňovaných silech se v čerstvě vypěněných perlách během chlazení vytvoří podtlak, způsobující jejich vysokou citlivost na mechanické poškození. Podtlak se vyrovnává difuzí vzduchu do buněk perlí a ty získávají větší mechanickou pevnost a zlepšuje se jejich další zpracovatelnost. Perle se současně i suší. Vytrálé perle se zpracovávají buď do bloků, které jsou pak řezány na požadovaný rozměr, nebo do podoby konečného výrobku. Dutina formy s parními tryskami ve stěnách se zcela vyplní předpěněnými perlami a vystaví se opět působení syté vodní páry. Perle změknou a působením pentanu a vzduchu v buňkách dále expandují. V uzavřeném prostoru formy se vzájemně svaří a vytvoří kompaktní blok. Po relativně krátké době na ochlazení jsou výrobky vyjmuty z formy a uskladněny před dalším zpracováním.

Bloky jsou dále řezány teplým nebo studeným drátem na desky. Okraje a povrch desek je možné pomocí speciálních technologií profilovat. Při výrobě elastifikovaných desek pěnového polystyrenu izolujících kročejový zvuk jsou bloky stlačovány v mechanických lisech přibližně na třetinu své výchozí tloušťky. Po uvolnění stlačení dosahují asi 4/5 svého původního rozměru. Uvedeným postupem dochází k narušení pevné buněčné struktury polystyrenu, a tím k výraznému zlepšení jeho akustických vlastností. Bloky jsou pak rozřezány na desky používané hlavně do plovoucích podlah pro snížení kročejového zvuku. Extrudovaný polystyren je možné vyrábět i jako nekonečný pás – předpěněné perle jsou zpěňovány na požadovanou tloušťku desek mezi dvojicí obíhajících nekonečných ocelových pásů. V ČR se ale tato technologie nevyskytuje.

5.2.3 Akustické vlastnosti extrudovaného polystyrenu

Pro konstrukce s vysokými požadavky na útlum zvuku byl vyvinut tzv. elastifikovaný polystyren s velmi nízkou dynamickou tuhostí. Např. plastifikovaný polystyren, určený pro kročejovou izolaci podlah, dokáže v konstrukci těžké plovoucí podlahy zajistit snížení hladiny kročejového zvuku o vynikajících 30–35 dB. [7]

5.3 Polypropylen (PP)

5.3.1 Charakteristika PP

Polypropylen je termoplastický polymer, používaný v mnoha odvětvích potravinářského, stavebního a textilního průmyslu a v laboratorních vybaveních. Prodává se pod obchodním názvem Triplen, Tatren atd.

Vyniká velmi dobrou chemickou a mechanickou odolností. V roce 2001 dosáhla roční celosvětová produkce polypropylenu přes 30 milionů tun. [8]

Polypropylen se vyznačuje vysokou rázovou pevností a použitelností v širokém rozsahu teplot. Tyto vlastnosti, kombinované s mimořádnou chemickou odolností, jsou hlavním důvodem, proč se tento materiál používá ve velkém měřítku v chemickém průmyslu, například v galvanotechnice a konstrukci filtračních zařízení. Polypropylény (PP) patří spolu s PE do skupiny polyolefinů. Na rozdíl od PE však snáší vyšší teploty. Polypropylén má dobrou chemickou odolnost, je hygienicky nezávadný a velmi dobře se svařuje, ale téměř ho nelze lepit. Měrná hmotnost je $0,92 \text{ g/cm}^3$. [9]

5.3.2 Výroba PP

Většina procesů, používaných pro výrobu polypropylenu, je velmi podobná procesům, používaných k výrobě vysokohustotního polyetylenu. Obecně jsou používány dva různé typy výroby polypropylenu:

- proces v plynné fázi
- procesy v suspenzi

Moderní procesy v suspenzi používají kapalný monomer namísto rozpouštědla. Proto mohou být tyto procesy považovány za procesy v bloku.

5.3.2.1 Výroba v plynné fázi

U procesů v plynné fázi přichází do kontaktu plynný propylén s tuhým katalyzátorem, který je důkladně rozptýlený v suchém prášku polymeru. Průmyslově se používají dvě rozdílné metody uskutečnění této reakce v závislosti na zvolené metodě výměny tepla. Procesy Union Carbide/Shell používají modifikovaný systém Unipol s polyetylenovým fluidním ložem.

BASF a Amoco používají mechanicky míchaná suchá prášková lože s odpařovacím chlazením ve vertikálních nebo horizontálních autoklávech.

5.3.2.2 Výroba v suspenzi

Blokové schéma výroby polypropylenu v suspenzi je znázorněno na obrázku 3-13. Propylen, rozpouštědlo (např. C₆-C₇ nasycené uhlovodíky), katalyzátor a kokatalyzátor jsou kontinuálně vnášeny do reaktoru, který může být buď míchaný nebo se smyčkou. Polymerace probíhá při teplotách 50-80°C a tlacích pod 2 MPa. Polypropylén tvoří malé práškovité částice suspendované v rozpouštědle. Malé množství ataktického polypropylénu se vytvoří jako vedlejší produkt v polymeračním kroku a částečně se rozpustí v rozpouštědle. Suspenze je kontinuálně odebírána z posledního reaktoru poté, co byl nezreagovaný propylén odstraněn ze suspenze a recyklován do reaktoru.

Suspenze polymeru je buď zpracována v alkoholickém vodném systému nebo přímo nastříknuta do zařízení na zahuštění (odstředivka), odkud vlhký prášek polymeru je veden do sušárny. Ze sušárny je prášek dopraven do extrudéru, smíchán s aditivou, roztaven, homogenizován a krájen na palety stejným způsobem jako při výrobě polyolefinů. [10]

5.4 Aplikace plastových materiálů v průmyslové výrobě

5.4.1 Plastová okna

Vzrůstajícím problémem zejména v městských aglomeracích a v blízkosti dopravních koridorů se stává stále vyšší zatížení lidského organismu hlukem. Tzv. hlukový smog je společně se znečištěním vzduchu hlavním faktorem ovlivňujícím kvalitu životního prostředí a proto je ochrana před nadměrným hlukem stále aktuálnější. Účinnou obranu proti hluku jak administrativních, tak i bytových prostor představuje speciálně konstruované izolační sklo pro zvukovou izolaci.

Spektrum hluku se skládá z širokého rozsahu frekvencí, které mají různou intenzitu v závislosti na zdroji hluku. Akustické vlastnosti izolačních skel se posuzují podle hodnoty indexu vzduchové neprůzvučnosti R_w [dB] a určují izolační schopnost proti šířícímu se zvuku. Protože funkce vyjadřující závislost vnímání hluku v místnosti na absolutní hodnotě intenzity hluku je logaritmická, zlepšení vzduchovou neprůzvučností i pouze o malou hod-

notu má velký význam pro subjektivní pocit výrazného snížení hluku. Snížení hladiny hluku v místnosti o 3 dB vnímá člověk jako snížení o celou polovinu. [11]

Pro výrobu plastových otvorových výplní jsou nutné následující materiálové vstupy:

- profily z houževnatého PVC
- ocelová výztuha s povrchovou úpravou (žárově pozinkovaná)
- celoobvodové kování (včetně olivy, madélek, atp.)
- izolační dvojsklo
- pomocný materiál (těsnění, silikonové tmely, doplňkový PVC materiál - např. zasklívací podložky, různé druhy krytek, atp.)

Obecně se pro výrobu plastových oken používají vícekomorové profilové systémy, v dnešní době obvykle tří- až pětikomorové. Čím větší je počet komor, tím lepší jsou tepelně-izolační vlastnosti daného profilu.

Pro okenní rámy se téměř výlučně používají minimálně tříkomorové profily. Střední, obvykle rozměrově největší komora slouží pro umístění žárově pozinkované ocelové výztuhy (o tloušťce stěny 1,5; 2 nebo 3 mm v závislosti na statické exponovanosti výrobku), vnější a vnitřní menší komory mají funkci tepelné a zvukové izolace.

Pro okenní křídla se používají zpravidla tříkomorové profily, avšak můžeme se setkat i s aplikací profilů dvoukomorových, například u profilů probarvených ve hmotě do béžové nebo hnědé barvy. I pro tyto profily platí, že největší komora je určena pro umístění ocelové výztuhy, ostatní komory plní tepelně-izolační funkci.

Komory tvoří uvnitř profilu jakýsi důmyslný labyrint. Díky němu lze profil odvodnit bez nebezpečí proniknutí vody k ocelové výztuži a její následné koroze.

Základní barvou profilů je barva bílá. Nicméně z PVC-U lze vyrobit okna jak nejrůznějších pastelových barev, tak i okna věrohodně imitující okna dřevěná (několik odstínů dubu, mahagon, borovice). V případě pastelových barev jde o tenkou fólii tlakově naválcovanou na bílý profil. U imitací dřev se imitující fólie válkuje buď na béžový podklad na bílém profilu (to v případě světlejších imitací jako je např. smrk) anebo na hnědý podklad na bílém profilu (v případě tmavších imitací dřeva - mahagon, tmavý dub). Fólie se mohou na profily válcovat jak z jedné strany (nejčastěji z exteriéru), tak z obou stran současně (z exteriéru i interiéru).

Okno vyrobené z jednostranně foliovaného profilu tedy při pohledu na fasádu buď imituje dřevěné okno (nebo je pastelové barvy), při pohledu z interiéru je bílé. Okno vyrobené z oboustranně foliovaného profilu imituje dřevo (nebo je pastelové barvy) při pohledu z exteriéru i z interiéru. [12]

5.4.2 Vlastnosti PVC oken

V dnešní podmínkách, kdy ceny energií neustále rostou se stává, že plastová okna jsou jednou z nejdůležitější součástí domu. Plastová okna, plastové dveře a zimní zahrady jsou prosklené části domu, kterými při použití nevhodných materiálů může docházet k úniku tepla, proto je velice důležité zvážit použité materiály pro nová plastová okna. [13]

5.4.2.1 Vlastnosti suroviny

Tvrdý PVC s vysokou rázovou houževnatostí (dle DIN 7748)

Specifická váha 1,43 g/cm³

Pevnost v tahu 48 MPa

Modul pružnosti 2700 MPa

Vrubová houževnatost +20°C (0°C)

30 kJ/m² (8 kJ/m²)

Rázová houževnatost -40°C bez zlomu

Koeficient délkové roztažnosti 0,08 mm/m/°C

Teplota měknutí + 82°C

Dobrá odolnost proti kyselinám, solím, alkoholům, aldehydům a kationtům.

5.4.2.2 Tepelná izolace

Tepelné ztráty oken představují 30-40% celkových ztrát, a tudíž je tepelná izolace pro spotřebitele velmi důležitá. Plastové profily např. firmy VEKA patří z pohledu tepelné ochrany do 1. třídy, tedy mezi materiály s nejlepšími parametry.

Všeobecně používaný součinitel prostupu tepla U [W/m²K] vyjadřuje množství tepla ve watech, které projde 1 m² okna při rozdílu venkovní a vnitřní teploty 1 K. Zjišťuje se výpočtem nebo měřením ve zkušebně. Samostatný PVC profil izoluje podstatně lépe ($U_f=1,4$)

než standardní izolační dvojsklo ($U_g=2,9$). S použitím výkonnostního zasklení ($U_g=1,1$) se docílí snížení součinitele prostupu tepla celého okna na cca $U_w=1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Požadavek normy ČSN 730540-2 "Tepelná ochrana budov" na součinitel prostupu tepla celého okna $U_w=1,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ nelze splnit použitím zasklení s $U_g = 2,9 \text{ W/m}^2\text{K}$. Naše společnost dodává do oken standardně nízkoemisivní pokovená izolační dvojskla s tepelně izolační charakteristikou $U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$.

5.4.2.3 Zvuková izolace

Stále rostoucí zatížení dopravním hlukem škodí lidskému organismu a způsobuje řadu onemocnění. Plastová okna z profilů VEKA vykazují výborné zvukově-izolační vlastnosti a s příslušnými typy skel splňují požadované hodnoty pro ochranu před hlukem.

Akustický útlum oken se vyjadřuje váženou (laboratorní) neprůzvučností R_w . Jednotkou neprůzvučnosti je 1 decibel (dB). Okna se zařazují do tříd zvukové izolace (TZI). Např.:

Standardní okno Softline 70 AD zasklení 4-16-4 $R_w=32 \text{ dB}$ (TZI 2)

Standardní okno Softline 70 AD zasklení 6-16-4 $R_w=37 \text{ dB}$ (TZI 3)

Požadavky na zvukový útlum jsou rozdílné podle prostředí, ve kterém se stavba nachází, a podle účelu, kterému slouží. Při běžném provozu postačí standardní izolační dvojskla ($R_w=31 \text{ dB}$), u rušných ulic, dálnic, letiště jsou k dispozici protihluková skla se zvýšenou hodnotou vzduchové neprůzvučnosti o 5-10 dB, což je výrazný rozdíl v útlumu hluku. Zvukově izolační zasklení má speciální skladbu dvojskla (rozdílnou tloušťku skleněných tabulí a rozšířenou dutinu mezi skly), případně může být běžné sklo nahrazeno sklem vrstveným. [14]

5.4.3 Vodovodní a odpadní potrubí

V oblasti hladké kanalizace a vnitřních odpadů má společnost Gebr. Ostendorf - OSMA zpracování plastů s. r. o. největší tržní podíl v České republice. Svůj podíl na trhu chce však jak v České republice, tak i na zahraničních trzích nadále zvyšovat. V rámci České republiky společnost nabízí své produkty především řetězci specializovaných velkoobchodů, stále více se však opírá o přímou komunikaci se zákazníky, jimiž jsou ve většině případů specialisté na instalaci, vodu, topení a plyn. Rovněž oslovuje potenciální klienty, kteří ve většině případů doposud využívali služeb dovozců. Konkurenční výhoda společnosti je

dána výrobou na území ČR, což umožňuje neustálou operativnost a připravenost na cestě k uspokojení požadavků zákazníka.



Obr. 9 HT-System (PPs)[®].



Obr. 10 Skolan dB.

Prvky vnitřní plastové kanalizace reprezentuje HT-System (PPs)[®] - odpadní trubky a tvarovky z polypropylenu, dodávané včetně veškerých doplňků a navrhované podle speciálních potřeb a požadavků tuzemské výstavby (přechodky, panelákové odbočky atd.) a Skolan dB - tiché odpadní potrubí, vyráběné z minerálem plněného polypropylenu, které má vynikající akustické vlastnosti a schopnost účinně tlumit hluk již v místě jeho samotného vzniku.



Obr. 11 KG 2000 Polypropylen®.



Obr. 12 KG-System (PVC)®.

K prvkům venkovní plastové kanalizace patří v první řadě nejmodernější kanalizační systém KG 2000 Polypropylen®, který je předurčen především pro exponovaná místa a výstavbu kanalizace v náročných podmínkách, kde lze počítat s hloubkou uložení až 8 m a dále také KG-System (PVC)®, vyráběný jedinečnou technologií koextruze. Tato technologie klade velký důraz na zvýšení využití potenciálu, který neměkčený polyvinylchlorid (PVC-U), jako vysoce vyspělá a lety prověřená surovina, nabízí. Výsledkem jsou kanalizační trubky a tvarovky s dokonale hladkou vnitřní stěnou, odolnou proti abrazi a houževnatou vnější vrstvou. RV-System OSMA® - revizní šachty a dvorní vpusti, je kompletní systém prvků, umožňujících výstavbu šachet různé hloubky s možností dodatečného připo-

jování nových větví kanalizace. Rozsáhlý sortiment společnosti uzavírají flexibilní korugované drenážní trubky OSMA^{Adren}.



Obr. 13 RV-System OSMA[®].



Obr. 14 OSMA^{Adren}.

Společnost Gebr. Ostendorf - OSMA zpracování plastů, s. r. o. se snaží svou rozsáhlou produkcí co nejvíce přiblížit především specialistům v oblasti inženýrských sítí a domovních instalací. [15]

6 STANOVENÍ KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI

Pro měření a vyhodnocení koeficientu zvukové pohltivosti byly použity následující materiály:

- polyvinylchlorid - tloušťka 3 mm
- polypropylen - tloušťka 1 mm a 1,6 mm
- extrudovaný polystyren - tloušťka 7 mm a 30 mm

Pro stanovení akustických vlastností bylo připraveno pět vzorků kruhovitěho tvaru každého materiálu o průměru 30 a 100 mm

6.1 Rozměrová analýza vybraných vzorků

V tab. 2 a tab. 3 jsou uvedeny průměrné hodnoty rozměrů měřených vzorků a jejich hustota.

Tab. 2 Rozměrová analýza vzorků pro malou trubici – 30 mm

Vzorek	Průměr [mm]	Tloušťka [mm]	Hustota [kg . m ⁻³]
PVC 3 mm	30,11 ± 0,02	3,01 ± 0,03	349,47
PP 1 mm	30,09 ± 0,03	1,01 ± 0,02	225,80
PP 1,6 mm	30,15 ± 0,02	1,62 ± 0,02	230,31
EPS 7 mm	29,51 ± 0,06	6,61 ± 0,08	44,66
EPS 30 mm	29,36 ± 0,03	28,33 ± 0,05	45,16

Tab. 3 Rozměrová analýza vzorků pro velkou trubici –100 mm

Vzorek	Průměr [mm]	Tloušťka [mm]	Hustota [kg . m ⁻³]
PVC 3 mm	99,88 ± 0,04	3,07 ± 0,04	349,47
PP 1 mm	99,89 ± 0,03	1,01 ± 0,02	225,80
PP 1,6 mm	99,91 ± 0,02	1,62 ± 0,05	230,31
EPS 7 mm	99,72 ± 0,04	6,53 ± 0,06	44,66
EPS 30 mm	99,79 ± 0,08	29,09 ± 0,03	45,16

6.2 Měření a vyhodnocení koeficientu zvukové pohltivosti vybraných plastových materiálů

6.2.1 Měřicí zařízení

Měření probíhalo na zařízení společnosti Brüel&Kjaer – dvoumikrofonová impedanční Kundtova trubice Brüel & Kjaer typ 4206, která se používá ke zjišťování koeficientu zvukové pohltivosti pro malé vzorky. Skládá se ze dvou trubic o průměru 100 a 30 mm umožňující měření ve frekvenčním rozsahu od 16 Hz do 1.6 kHz pro velkou trubici (100 mm) a od 50 Hz do 6.3 kHz pro malou trubici (30 mm). Pro samotnou analýzu využívá dvoukanálový signální analyzátor Brüel & Kjaer typ 2034 a aplikační software BZ5050 zabezpečující jednoduchou obsluhu prostřednictvím PC.

Výsledkem měření je textový soubor obsahující údaje o závislosti koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci.



Obr. 15 Zařízení Brüel & Kjaer typ 4206.

6.2.2 Návod na obsluhu Brüel & Kjaer trubice s obslužným programem BZ 5050

- na počítači vejít do složky: E:\BZ 5050
- spustit program: VELKATR.BAT (pro velkou trubicí – 100 mm) , MALATR.BAT (pro malou trubicí – 30 mm)
- v programu spustit: SET-UP
- v SET-UP zvolit: LARGE TUBE STANDART (pro velkou trubicí – 100 mm), SMALL TUBE STANDART (pro malou trubicí – 30 mm)
- v programu spustit: F3 - CALIBRATION
- na trubicí vložit mikrofon A do otvoru 3, mikrofon B do otvoru 2
- do trubice vložit standardní kalibrační vzorek
- v SET-UP zvolit:
 - pro velkou trubicí - LINEAR,
 - na trubicí přepnout přepínač na: LINEAR
 - pro malou trubicí – HIGH-PASS
 - na trubicí přepnout přepínač na: HIGH-PASS
- v SET-UP zvolit: POCET PRUMERU 50
- v programu spustit: F4 - měření
- na trubicí vložit mikrofon A do otvoru 2, mikrofon B do otvoru 3
- v programu spustit: F4 - měření
- v programu uložit kalibraci
- do trubice vložit vzorek
- v programu spustit: F4 - měření (v rozsahu 16-1600Hz - pro velkou, 50 – 6300 Hz – pro malou)
- v programu uložit měření
- v programu spustit: PRINT
- v PRINT zvolit: SELECTED BUFFERS
- v SELECTED BUFFERS zvolit měření, které chceme uložit
- v SELECTED BUFFERS změnit výstup na ASCII
- vytisknout jako ASCII FILE (měření se uloží na HDD PC v souboru typu *.prn zpracovatelném dále v MS Excel)

6.2.3 Vyhodnocení měření koeficientu zvukové pohltivosti vybraných plastových materiálů

Naměřené hodnoty koeficientu zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci vybraných plastových materiálů jsou uvedeny v přílohách (P I – P X).

Tlumící vlastnosti materiálů byly uvažovány ve frekvenční oblasti 100 – 6300 Hz.

Ze závislosti koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro polyvinylchlorid o tloušťce 3 mm (viz. příloha P IX a P X) lze konstatovat, že tento materiál dosahuje nejvyšší hodnoty koeficientu zvukové pohltivosti $\alpha = 0,846$ při frekvenci 6300 Hz a průměrné hodnoty $\alpha = 0,273$ ve frekvenčním pásmu 1250-5000 Hz .

U polypropylenu tloušťky 1 mm (viz. příloha P I a P II) dosahuje koeficient zvukové pohltivosti nejvyšší hodnoty $\alpha = 0,89$ při frekvenci 630 Hz a průměrné hodnoty $\alpha = 0,271$ ve frekvenčním pásmu 1250-5000 Hz.

Nejvyšší hodnota koeficientu zvukové pohltivosti $\alpha = 0,613$ materiálu polypropylen 1,6 mm (viz. příloha P III a P IV) byla naměřena při frekvenci 6300 Hz a průměrná hodnota $\alpha = 0,193$ ve frekvenčním pásmu 1250-5000 Hz.

Extrudovaný polystyren tloušťky 7 mm (viz. příloha P V a P VI) dosahoval nejvyšší hodnoty koeficientu zvukové pohltivosti $\alpha = 0,456$ při frekvenci 100 Hz a průměrné hodnoty $\alpha = 0,09$ ve frekvenčním pásmu 1250-5000 Hz. Extrudovaný polystyren tloušťky 30 mm (viz. příloha P VII a P VIII) dosahoval maximální hodnoty koeficientu zvukové pohltivosti $\alpha = 0,882$ při frekvenci 250 Hz a průměrné hodnoty $\alpha = 0,203$ ve frekvenčním pásmu 1250-5000 Hz.

Z naměřených závislostí lze konstatovat, že z měřených materiálů má nejlepší tlumící vlastnosti materiál polyvinylchlorid. Nižší hodnoty koeficientu zvukové pohltivosti byly naměřeny u materiálu polypropylen a nejnižší hodnoty byly stanoveny pro materiál extrudovaný polystyren.

Měření probíhalo při teplotě okolí $t = 24^{\circ}\text{C}$.

Z uvedených výsledků také vyplývá, že tlumící vlastnosti závisí na hustotě materiálu a to tak, že s rostoucí hustotou se zlepšují akusticko-izolační vlastnosti měřených materiálů.

ZÁVĚR

Tato práce se zabývá akustickými vlastnostmi vybraných plastových materiálů.

V teoretické části byla zpracována problematika akustického vlnění, problematika měření akustických imisí, dále zástěn a zvukoizolačních krytů, a také problematika akustických vlastností pohltivých materiálů a aplikace těchto materiálů v praxi.

Praktická část se dělí na dvě části. V první části byly zpracovány současné poznatky o vybraných plastových materiálech – polyvinylchloridu, polypropylenu a extrudovaném polystyrenu – se zaměřením na výrobu a charakteristiku těchto materiálů a jejich aplikaci do průmyslové výroby.

V druhé části byly experimentálně stanoveny hodnoty koeficientu zvukové pohltivosti pro frekvenční rozmezí 100 – 6300 Hz výše uvedených materiálů. Jako materiál s nejlepšími akustickými vlastnostmi byl vyhodnocen polyvinylchlorid. Proto je tento materiál aplikován do výroby podlahovin a krycích vrstev, kde je potřeba eliminovat zejména kročejový hluk a nežádoucí vibrace. Tento materiál je také používán pro výrobu plastových oken, která v posledních deseti letech představují velký mezník, týkající se akustické a tepelné izolace, ve stavebním průmyslu.

Nepatrně nižší hodnoty koeficientu zvukové pohltivosti vykazoval materiál polypropylen, který je v praxi používán pro výrobu vodovodních a odpadních trubek, kdy může docházet k nepříjemnému hluku protékajících tekutin.

Nejhorší akustické vlastnosti byly stanoveny pro materiál extrudovaný polystyren, který ovšem pro své užité vlastnosti (zpracovatelnost, tvarovou stálost, odolnost vůči tepelným změnám a další) je široce používán zejména ve stavebním průmyslu.

Vybrané materiály nepatří mezi nejpoužívanější v oblasti odhlučnění a akustických izolací. V určité míře ovšem tvoří část prostředí, ve kterém se člověk pohybuje a znalost akustických charakteristik vybraných materiálů je potřebná zvláště při rozhodování o aplikaci v mnoha průmyslových odvětvích.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Monografie:

- [1] NOVÝ R.: „*Hluk a chvění*“, Učební texty vysokých škol. ČVUT Praha (2000), 389 s., 2.vydání (ISBN 80-01-02246-3)
- [2] VAŇKOVÁ M. a kol.: „*Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí, část II.*“, Učební texty vysokých škol. VUT Brno (1996), 164 s., 1.vydání (ISBN 80-214-0818-9)
- [3] SMETANA, Ctirad a kol.: „*Hluk a vibrace, měření a hodnocení*“, Praha : Sdělovací technika (1998), 188 s., 1.vydání (ISBN 80-901936-2-5)
- [4] VAŇKOVÁ, M. a kol.: „*Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí, část I.*“, Učební texty vysokých škol. VUT Brno (1995), 144 s., 1. vydání (ISBN 80-214-0695-X)
- [5] EVEREST, F. Alton. „*Master Handbook of Acoustics*“, USA: McGraw-Hill/TAB Electronics (2001), 592 s., 4. vydání (ISBN 0071360972)

Internetové odkazy:

- [6] *PVC: Plastová-okna.name; Článek - PVC*, [online], [cit. 2007-05-12]. Dostupné z WWW: <http://www.plastova-okna.name/pvc.php>
- [7] *IZOLACE.CZ - Tepelná technika, obvodové pláště; Články - Tepelná technika, obvodové pláště - Vlastnosti a možnosti pěnového polystyrenu*, [online], [cit. 2007-05-12]. Dostupné z WWW: <http://www.izolace.cz/index.asp?module=ActiveWeb&page=WebPage&DocumentID=2159>
- [8] *Polypropylen – Wikipedie, otevřená encyklopedie; Článek – Polypropylen*, [online], [cit. 2007-05-18]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Polypropylen>
- [9] *Portaflex - plastové clony a kyvná vrata, materiály pro stavebnictví a reklamu, transportní pojezdová technika; Materiály pro stavebnictví – POLYPROPYLEN*, [online], [cit. 2007-06-21]. Dostupné z WWW: <http://www.portaflex.cz/index.php?page=415>

- [10] *Integrovaná prevence a omezování znečištění; Část 3.1.2 – Polypropylen*, [online], [cit. 2007-07-11]. Dostupné z WWW: <http://www.ippc.cz/soubory/polymery2/index.html>
- [11] *Plastová okna VPO Protivanov; Sortiment – Hlavní výrobní materiál – Zasklení*, [online], [cit. 2007-07-11]. Dostupné z WWW: <http://www.vpo.cz/sortiment.php?search=hlavní-vyrobní-material&menu=0&tid=77&titulek=Zasklení%C3%AD>
- [12] *OKNA, Plastová okna; Výroba plastových oken*, [online], [cit. 2007-07-13]. Dostupné z WWW: <http://okna.kvalitne.cz/vyroba-plastovych-oken.htm>
- [13] *PLASTOVÁ OKNA - Zdarma nezávazná nabídka; Článek - Plastová okna*, [online], [cit. 2007-07-27]. Dostupné z WWW: <http://plastova-okna.sedma.cz/>
- [14] *VEKRA okna; Výrobky – Vlastnosti PVC oken*, [online], [cit. 2007-07-26]. Dostupné z WWW: <http://www.vekra.cz/33-vlastnosti-pvc-oken.html>
- [15] *TZB-info - stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov; Voda, kanalizace - Starší články - Strana 7 - Budoucnost v kvalitních plastech*, [online], [cit. 2007-07-27]. Dostupné z WWW: <http://voda.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=3599&h=226&pl=37>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

α	Činitel zvukové pohltivosti
β	Činitel zvukové odrazivosti
δ	Vliv rozdílu mezi dráhou zvuku přes překážku a přímou dráhou zvuku (m)
Δp	Rozdíl akustického tlaku před a za vrstvou akustického materiálu (Pa)
ε	Činitel přeměny akustické energie plochy
ε	Činitel děrování
λ	Délka vlny (m)
μ	Poissonova konstanta
ρ	Hustota (kg m^{-3})
ρ_0	Hustota vzduchu za normálních podmínek (kg m^{-3})
$\rho_0 c$	Vlnový odpor vzduchu (Pa s m^{-1})
τ	Činitel průzvučnosti plochy
Ω	Prostorový úhel otevření krytu (sr)
A	Akustický tlak (Pa)
A	Pohltivost prostoru (m^2)
a, b	Rozměry desky (m)
A_1	Původní pohltivost prostoru (m^2)
A_2	Pohltivost prostoru po úpravě (m^2)
c	Rychlost zvuku ve vzduchu (m s^{-1})
c_L	Rychlost podélného vlnění (m s^{-1})
c_T	Rychlost příčného vlnění (m s^{-1})
d	Průměr (m)
D	Vložný útlum (dB)
E	Dynamický modul pružnosti v tahu (N m^{-2})

f	Frekvence kmitu (Hz)
f_0	Vlastní frekvence soustavy (Hz)
G	Modul pružnosti ve smyku (N m^{-2})
h	Délka hrany zástěny (m)
h'	Korigovaná délka (m)
K	Korekce
l	Vzdálenost desky od pevné stěny (m)
l,d	Tloušťka vzduchového polštáře (m)
L_1	Hladina akustického tlaku v poli odražených vln v místnosti zdroje (dB)
L_2	Hladina akustického tlaku v sousední přijímací místnosti (dB)
L_A	Hladina akustického tlaku (dB)
$L_{A,99}$	Procentní (distribuční) hladina akustického tlaku (dB)
L_{Aeq}	Ekvivalentní hladina akustického tlaku (dB)
L_{AI}	Hladina akustického tlaku při časové konstantě I (dB)
L_{AS}	Hladina akustického tlaku při časové konstantě S (dB)
L_{okt}	Hladiny akustického tlaku v oktávovém pásmu (dB)
L_{p_1}	Hladina akustického tlaku vně kabiny (dB)
L_{p_2}	Hladina akustického tlaku v oktávovém pásmu uvnitř kabiny (dB)
$L_{p,m}$	Maximální přípustná velikost hodnotící hladiny (dB)
L_{pA}	Časový průběh hladin akustického tlaku (dB)
L_z	Základní hladina (dB)
m	Hmotnost (kg)
m'	Plošná hmotnost membrány (kg m^{-2})
n	Počet ploch tvořící stěny krytu, které mají různou akustickou kvalitu
p	Akustický tlak (Pa)

P	Příjemce
p_0	Amplituda akustického tlaku (Pa)
p_c	Počáteční celkový tlak (Pa)
q	Objemová rychlost vzduchu proudícího do vrstvy ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
r_0	Poloměr otvoru (m)
R	Stupeň vzduchové neprůzvučnosti (dB)
R	Odpor proti proudění vzduchu (Pa s m^{-3})
R_w	Střední stupeň neprůzvučnosti (dB)
S	Plošný obsah (m^2)
T	Doba jednoho kmitu (s)
t	Čas (s)
u	Akustická výchylka (m)
u	Rychlost proudění vzduchu do vrstvy (m s^{-1})
u_0	Amplituda výchylky (m)
U	Součinitel prostupu tepla ($\text{W m}^2 \text{K}^{-1}$)
v	Akustická rychlost (m s^{-1})
v_0	Amplituda akustické rychlosti (m s^{-1})
V_0	Celkový objem materiálu
V_p	Objem pórů
Y	Poréznost
Z	Zdroj
Z_S	Měrná akustická impedance materiálu (Pa s m^{-1})

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Šíření zvuku od zdroje.....	12
Obr. 2. Akustická výchylka jako funkce vzdálenosti.....	12
Obr. 3. Vývoj akustické vlny v bodové řadě.....	13
Obr. 4. Časový průběh celkového statického tlaku ve vzduchu.	14
Obr. 5. Zástěna tenká a ve formě budovy, zemního valu apod.....	30
Obr. 6. Model ideální realizace zástěny.....	30
Obr. 7. Schema Helmholtzova rezonátoru.....	42
Obr. 8. Helmholtzův rezonátor z děrovaných panelů.	43
Obr. 9 HT-System (PPs) [®]	57
Obr. 10 Skolan dB.	57
Obr. 11 KG 2000 Polypropylen [®]	58
Obr. 12 KG-System (PVC) [®]	58
Obr. 13 RV-System OSMA [®]	59
Obr. 14 OSMA [®] dren.....	59
Obr. 15 Zařízení Brüel & Kjaer typ 4206.	61

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Rychlost šíření podélných vln v různých látkách.	16
Tab. 2 Rozměrová analýza vzorků pro malou trubici – 30 mm.....	60
Tab. 3 Rozměrová analýza vzorků pro velkou trubici –100 mm.....	60

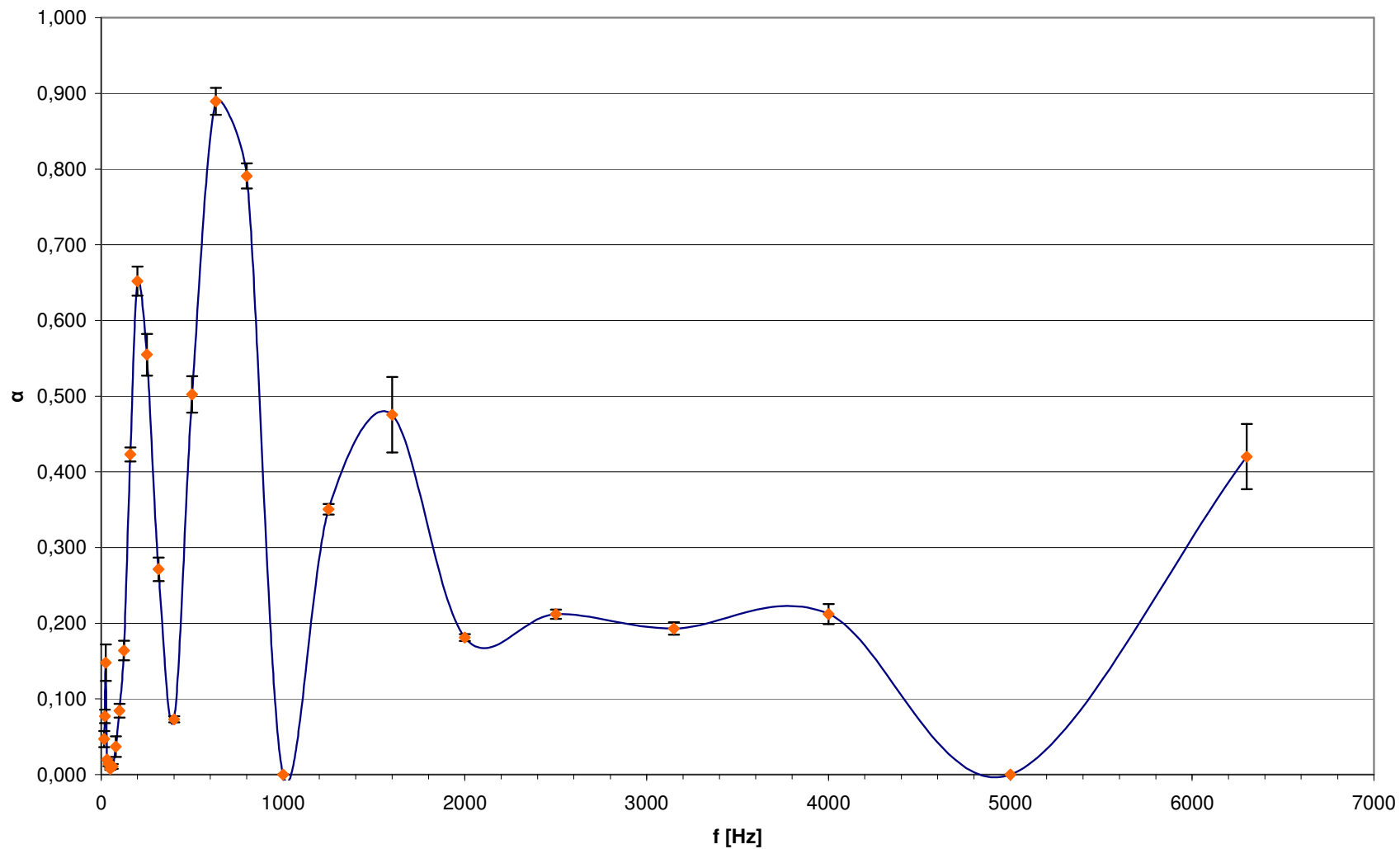
SEZNAM PŘÍLOH

- P I Tabulka hodnot koeficientu zvukové pohltivosti a frekvence pro polypropylen (tl. 1 mm)
- P II Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro polypropylen (tl. 1 mm)
- P III Tabulka hodnot koeficientu zvukové pohltivosti a frekvence pro polypropylen (tl. 1,6 mm)
- P IV Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro polypropylen (tl. 1,6 mm)
- P V Tabulka hodnot koeficientu zvukové pohltivosti a frekvence pro extrudovaný polystyren (tl. 7 mm)
- P VI Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro extrudovaný polystyren (tl. 7 mm)
- P VII Tabulka hodnot koeficientu zvukové pohltivosti a frekvence pro extrudovaný polystyren (tl. 30 mm)
- P VIII Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro extrudovaný polystyren (tl. 30 mm)
- P IX Tabulka hodnot koeficientu zvukové pohltivosti a frekvence pro polyvinylchlorid (tl. 3 mm)
- P X Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro polyvinylchlorid (tl. 3 mm)

**PŘÍLOHA P I - TABULKA HODNOT KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI A FREKVENCE
PRO POLYPROPYLEN (TL. 1 MM)**

Frekvence [Hz]	Polypropylen 1,0 mm										Průměr	Sm. Odchylka
	malá trubice					velká trubice						
	Koeficient zvukové pohltivosti - α					Koeficient zvukové pohltivosti - α						
	vzorek č.1	vzorek č.2	vzorek č.3	vzorek č.4	vzorek č.5	vzorek č.1	vzorek č.2	vzorek č.3	vzorek č.4	vzorek č.5		
16	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,047	0,011
20	-	-	-	-	-	0,077	0,119	0,035	0,077	0,077	0,077	0,009
25	0,211	0,211	0,211	0,211	0,211	0,024	0,075	0,161	0,048	0,116	0,148	0,024
31,5	-	-	-	-	-	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,000
40	0,008	0,004	0,007	0,014	0,008	0,024	0,012	0,011	0,021	0,036	0,015	0,003
50	0,008	0,008	0,002	0,009	0,012	0,001	0,015	0,008	0,008	0,006	0,008	0,001
63	0,032	0,019	0,019	0,005	0,019	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,011	0,003
80	0,036	0,028	0,109	0,083	0,098	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,037	0,014
100	0,091	0,051	0,065	0,131	0,085	-	-	-	-	-	0,085	0,009
125	0,150	0,149	0,166	0,236	0,119	-	-	-	-	-	0,164	0,013
160	0,463	0,380	0,415	0,440	0,417	-	-	-	-	-	0,423	0,009
200	0,685	0,714	0,665	0,652	0,544	-	-	-	-	-	0,652	0,019
250	0,598	0,672	0,551	0,533	0,420	-	-	-	-	-	0,555	0,028
315	0,300	0,337	0,268	0,252	0,199	-	-	-	-	-	0,271	0,015
400	0,082	0,079	0,086	0,063	0,055	-	-	-	-	-	0,073	0,004
500	0,551	0,583	0,520	0,484	0,374	-	-	-	-	-	0,502	0,024
630	0,923	0,937	0,901	0,899	0,788	-	-	-	-	-	0,890	0,018
800	0,821	0,848	0,795	0,790	0,701	-	-	-	-	-	0,791	0,017
1000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1250	0,368	0,315	0,370	0,363	0,337	-	-	-	-	-	0,351	0,007
1600	0,537	0,524	0,538	0,540	0,528	0,520	0,484	0,553	0,030	0,500	0,475	0,050
2000	0,203	0,167	0,168	0,181	0,187	-	-	-	-	-	0,181	0,004
2500	0,194	0,189	0,223	0,219	0,235	-	-	-	-	-	0,212	0,006
3150	0,174	0,157	0,211	0,197	0,226	-	-	-	-	-	0,193	0,008
4000	0,202	0,139	0,239	0,228	0,253	-	-	-	-	-	0,212	0,013
5000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6300	0,328	0,430	0,448	0,256	0,639	-	-	-	-	-	0,420	0,043

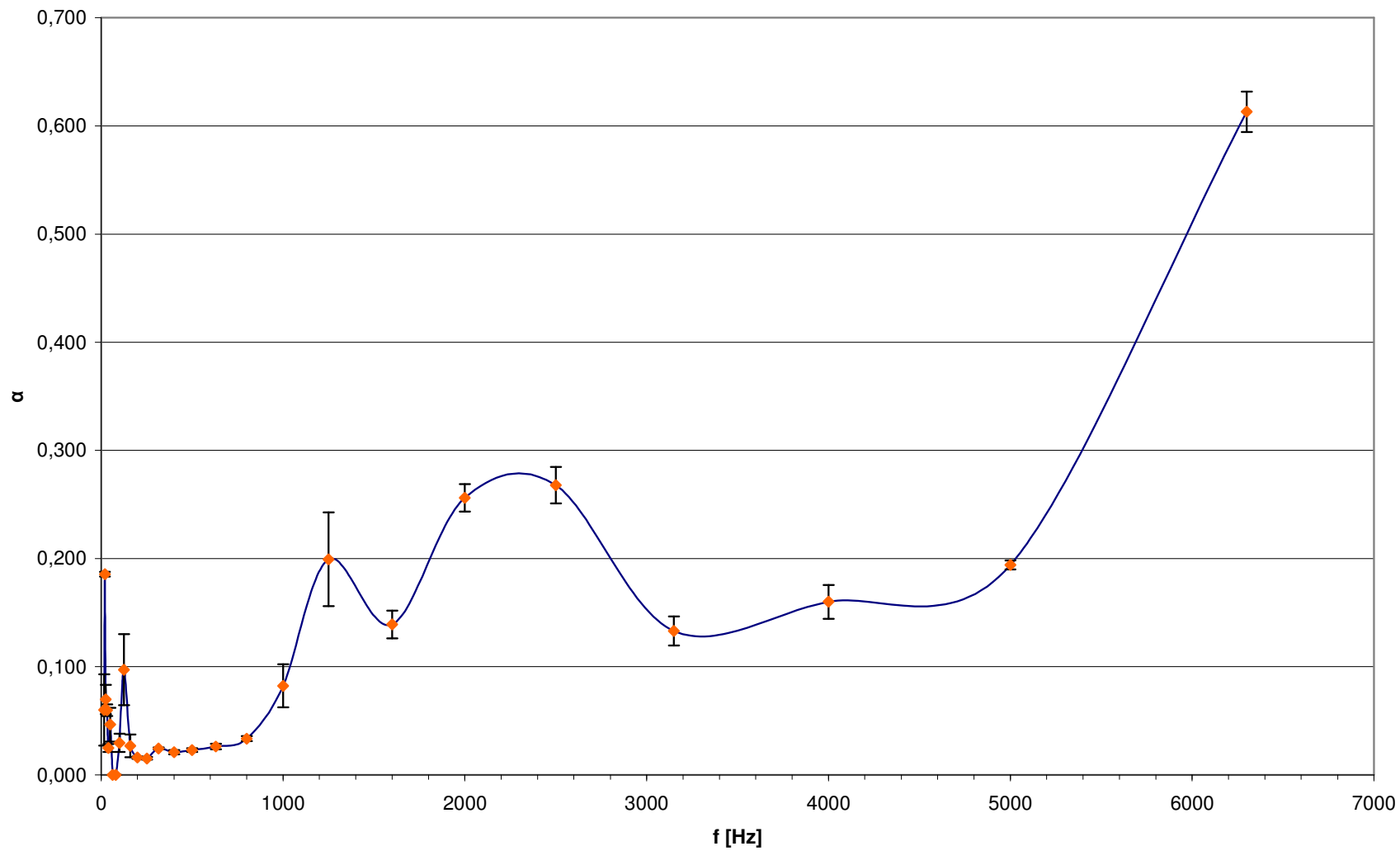
PŘÍLOHA P II - GRAFICKÁ ZÁVISLOST KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI NA FREKVENCI PRO POLYPROPYLEN (TL. 1 MM)



**PŘÍLOHA P III - TABULKA HODNOT KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI A FREKVENCE
PRO POLYPROPYLEN (TL. 1,6 MM)**

Frekvence [Hz]	Polypropylen 1,6 mm										Průměr	Sm. Odchylka
	malá trubice					velká trubice						
	Koeficient zvukové pohltivosti - α					Koeficient zvukové pohltivosti - α						
	vzorek č.1	vzorek č.2	vzorek č.3	vzorek č.4	vzorek č.5	vzorek č.1	vzorek č.2	vzorek č.3	vzorek č.4	vzorek č.5		
16	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,065	0,334	0,051	0,027	0,119	0,060	0,033
20	-	-	-	-	-	0,186	0,185	0,186	0,185	0,186	0,186	0,002
25	0,069	0,135	0,071	0,069	0,001	0,139	0,026	0,047	0,071	0,071	0,070	0,013
31,5	0,087	0,062	0,075	0,075	0,075	0,044	0,045	0,045	0,046	0,045	0,060	0,005
40	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,015	0,025	0,003	0,012	0,019	0,025	0,004
50	0,016	0,078	0,152	0,082	0,082	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,047	0,016
63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,000	0,009	0,004	0,003	0,005	0,030	0,008
125	-	0,207	0,207	0,207	0,207	0,006	0,013	0,008	0,009	0,011	0,097	0,033
160	-	0,116	0,024	0,019	0,020	0,009	0,014	0,015	0,014	0,011	0,027	0,011
200	-	0,014	0,023	0,012	0,018	0,012	0,019	0,018	0,015	0,014	0,016	0,001
250	-	0,016	0,022	0,016	0,018	0,009	0,014	0,016	0,016	0,011	0,015	0,001
315	-	0,027	0,028	0,021	0,022	0,021	0,025	0,029	0,024	0,024	0,025	0,001
400	-	0,028	0,030	0,025	0,026	0,013	0,019	0,016	0,017	0,015	0,021	0,002
500	-	0,030	0,030	0,027	0,026	0,016	0,023	0,018	0,018	0,019	0,023	0,002
630	-	0,035	0,039	0,034	0,032	0,018	0,023	0,019	0,018	0,019	0,026	0,003
800	-	0,038	0,040	0,036	0,042	0,024	0,028	0,042	0,027	0,026	0,034	0,002
1000	0,053	0,051	0,052	0,049	0,059	0,051	0,081	0,256	0,093	0,079	0,082	0,020
1250	-	0,079	0,075	0,072	0,086	0,143	0,251	0,394	0,398	0,296	0,199	0,043
1600	-	0,133	0,160	0,099	0,113	0,118	0,121	0,149	0,236	0,123	0,139	0,013
2000	0,249	0,279	0,315	0,203	0,235	-	-	-	-	-	0,256	0,013
2500	0,251	0,244	0,195	0,328	0,321	-	-	-	-	-	0,268	0,017
3150	0,211	0,100	0,104	0,126	0,125	-	-	-	-	-	0,133	0,013
4000	0,251	0,117	0,143	0,149	0,140	-	-	-	-	-	0,160	0,016
5000	0,194	0,188	0,213	0,200	0,176	-	-	-	-	-	0,194	0,004
6300	0,507	0,620	0,670	0,625	0,644	-	-	-	-	-	0,613	0,019

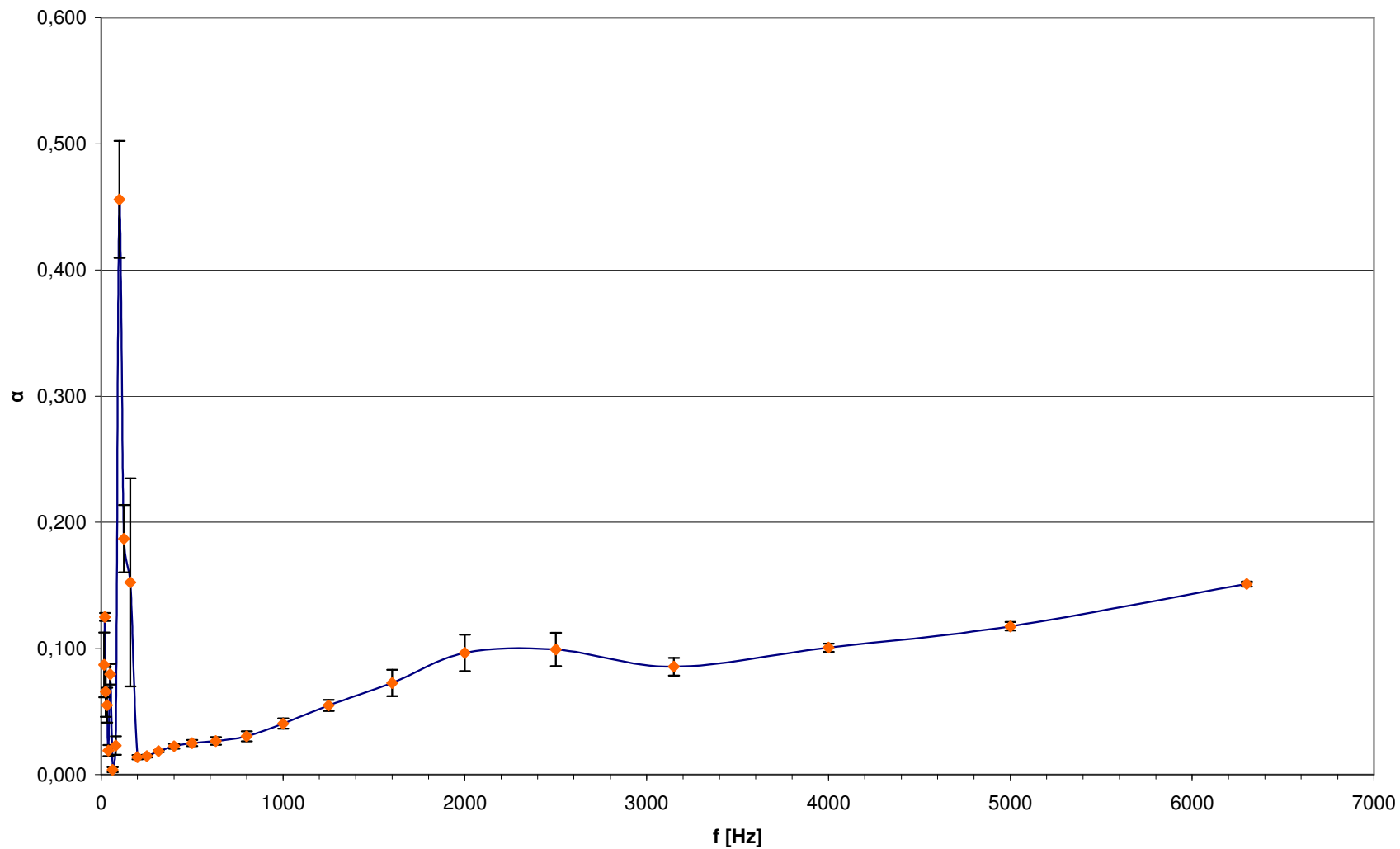
PŘÍLOHA P IV - GRAFICKÁ ZÁVISLOST KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI NA FREKVENCI PRO POLYPROPYLEN (TL. 1,6 MM)



**PŘÍLOHA P V - TABULKA HODNOT KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI A FREKVENCE
PRO EXTRUDOVANÝ POLYSTYREN (TL. 7 MM)**

Frekvence [Hz]	Extrudovaný polystyren 7 mm										Průměr	Sm. Odchylka
	malá trubice					velká trubice						
	Koeficient zvukové pohltivosti - α					Koeficient zvukové pohltivosti - α						
	vzorek č.1	vzorek č.2	vzorek č.3	vzorek č.4	vzorek č.5	vzorek č.1	vzorek č.2	vzorek č.3	vzorek č.4	vzorek č.5		
16	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,164	0,164	0,164	0,164	0,164	0,087	0,026
20	-	-	-	-	-	0,125	0,125	0,125	0,110	0,140	0,125	0,003
25	0,129	0,053	0,013	0,215	0,041	0,080	0,041	0,018	0,041	0,025	0,066	0,020
31,5	-	-	-	-	-	0,052	0,029	0,131	0,054	0,009	0,055	0,014
40	0,016	0,016	0,028	0,016	0,003	0,023	0,052	0,019	0,002	0,018	0,019	0,004
50	0,041	0,080	0,118	0,080	0,080	-	-	-	-	-	0,080	0,008
63	-	-	-	-	-	0,004	0,003	0,004	0,003	0,005	0,004	0,002
80	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,023	0,007
100	0,456	0,236	0,676	0,456	0,456	-	-	-	-	-	0,456	0,046
125	0,196	0,309	0,187	0,056	0,187	-	-	-	-	-	0,187	0,027
160	0,003	0,637	0,637	0,007	0,181	0,009	0,012	0,015	0,012	0,011	0,152	0,082
200	0,011	0,028	0,012	0,012	-	0,012	0,013	0,012	0,010	0,014	0,014	0,002
250	0,013	0,020	0,010	0,010	-	0,016	0,016	0,016	0,016	0,015	0,015	0,001
315	0,019	0,022	0,021	0,021	-	0,017	0,016	0,017	0,017	0,017	0,019	0,001
400	0,027	0,031	0,029	0,026	-	0,018	0,017	0,018	0,018	0,018	0,022	0,002
500	0,031	0,037	0,035	0,026	-	0,020	0,019	0,019	0,019	0,019	0,025	0,002
630	0,034	0,040	0,040	0,032	-	0,019	0,019	0,019	0,018	0,019	0,027	0,003
800	0,042	0,042	0,052	0,036	-	0,020	0,020	0,020	0,021	0,021	0,030	0,004
1000	0,057	0,044	0,058	0,050	0,052	0,027	0,030	0,028	0,032	0,027	0,041	0,004
1250	0,083	0,042	0,062	0,068	0,064	0,042	0,055	0,045	0,044	0,044	0,055	0,004
1600	0,128	0,043	0,063	0,101	0,084	0,054	0,115	0,044	0,033	0,062	0,073	0,010
2000	0,156	0,040	0,059	0,131	0,097	-	-	-	-	-	0,097	0,014
2500	0,131	0,042	0,061	0,130	0,132	-	-	-	-	-	0,099	0,013
3150	0,107	0,054	0,072	0,109	0,086	-	-	-	-	-	0,086	0,007
4000	0,106	0,082	0,103	0,111	0,101	-	-	-	-	-	0,101	0,003
5000	0,109	0,104	0,128	0,129	0,118	-	-	-	-	-	0,118	0,003
6300	0,154	0,140	0,157	0,154	0,151	-	-	-	-	-	0,151	0,002

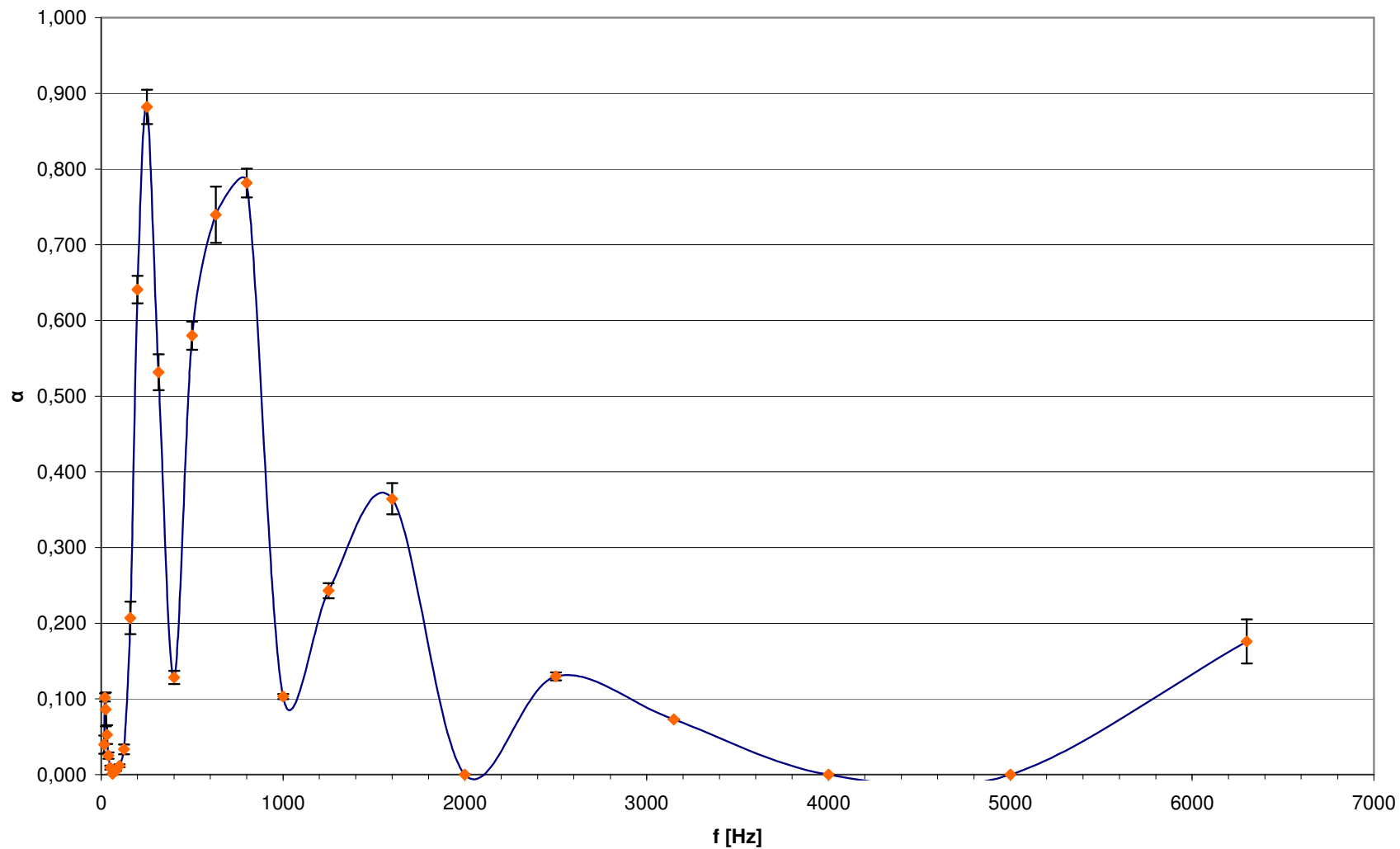
PŘÍLOHA P VI - GRAFICKÁ ZÁVISLOST KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI NA FREKVENCI PRO EXTRUDOVANÝ POLYSTYREN (TL. 7 MM)



PŘÍLOHA P VII - TABULKA HODNOT KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI A FREKVENCE PRO EXTRUDOVANÝ POLYSTYREN (TL. 30 MM)

Frekvence [Hz]	Extrudovaný polystyren 30 mm										Průměr	Sm. Odchyłka
	malá trubice					velká trubice						
	Koeficient zvukové pohltivosti - α					Koeficient zvukové pohltivosti - α						
	vzorek č.1	vzorek č.2	vzorek č.3	vzorek č.4	vzorek č.5	vzorek č.1	vzorek č.2	vzorek č.3	vzorek č.4	vzorek č.5		
16	0,012	0,012	0,006	0,018	0,012	0,067	0,008	0,067	0,109	0,085	0,040	0,012
20						0,102	0,128	0,102	0,076	0,102	0,102	0,005
25	0,026	0,150	0,008	0,081	0,024	0,105	0,114	0,019	0,100	0,233	0,086	0,022
31,5	-	-	-	-	-	0,037	0,013	0,053	0,038	0,123	0,053	0,012
40	-	-	-	-	-	0,025	0,003	0,035	0,025	0,038	0,025	0,004
50	0,002	0,001	0,001	0,002	0,002	0,017	0,025	0,009	0,017	0,017	0,009	0,003
63	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	-	-	-	-	-	0,001	0,000
80	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,005	0,001
100	0,021	0,003	0,012	0,006	0,003	0,016	0,018	0,015	0,009	0,013	0,012	0,002
125	0,044	0,037	0,030	0,048	0,081	0,022	0,016	0,014	0,016	0,025	0,033	0,006
160	0,212	0,154	0,132	0,219	0,317	-	-	-	-	-	0,207	0,021
200	0,670	0,596	0,560	0,668	0,710	-	-	-	-	-	0,641	0,018
250	0,883	0,938	0,946	0,889	0,756	-	-	-	-	-	0,882	0,023
315	0,528	0,586	0,623	0,506	0,415	-	-	-	-	-	0,532	0,024
400	0,164	0,081	0,132	0,130	0,135	-	-	-	-	-	0,128	0,009
500	0,630	0,524	0,500	0,622	0,624	-	-	-	-	-	0,580	0,019
630	0,776	0,626	0,606	0,782	0,909	-	-	-	-	-	0,740	0,037
800	0,813	0,725	0,709	0,799	0,862	-	-	-	-	-	0,782	0,019
1000	-	-	-	-	-	0,110	0,096	0,104	0,088	0,117	0,103	0,003
1250	0,251	0,251	0,251	0,251	0,251	0,277	0,246	0,219	0,165	0,269	0,243	0,010
1600	0,398	0,337	0,335	0,386	0,477	0,430	0,396	0,308	0,252	0,325	0,364	0,021
2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2500	0,150	0,126	0,102	0,136	0,135	-	-	-	-	-	0,130	0,005
3150	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073	-	-	-	-	-	0,073	0,000
4000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6300	0,314	0,176	0,176	0,176	0,038	-	-	-	-	-	0,176	0,029

PŘÍLOHA P VIII - GRAFICKÁ ZÁVISLOST KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI NA FREKVENCI PRO EXTRUDOVANÝ POLYSTYREN (TL. 30 MM)



**PŘÍLOHA P IX - TABULKA HODNOT KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI A FREKVENCE
PRO POLYVINYLCHLORID (TL. 3 MM)**

Frekvence [Hz]	PVC 3,0 mm										Průměr	Sm. Odchyłka
	malá trubice					velká trubice						
	Koeficient zvukové pohltivosti - α					Koeficient zvukové pohltivosti - α						
	vzorek č.1	vzorek č.2	vzorek č.3	vzorek č.4	vzorek č.5	vzorek č.1	vzorek č.2	vzorek č.3	vzorek č.4	vzorek č.5		
16	0,002	0,000	0,001	0,001	0,001	0,171	0,040	0,109	0,117	0,109	0,055	0,021
20	-	-	-	-	-	0,115	0,007	0,061	0,061	0,061	0,061	0,011
25	0,041	0,032	0,022	0,032	0,032	0,105	0,218	0,144	0,054	0,200	0,088	0,024
31,5	-	-	-	-	-	0,056	0,108	0,046	0,014	0,056	0,056	0,010
40	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,045	0,006	0,026	0,026	0,026	0,018	0,004
50	0,023	0,070	0,053	0,037	0,147	0,008	0,010	0,010	0,012	0,009	0,038	0,014
63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	0,190	0,190	0,190	0,190	0,190	-	-	-	-	-	0,190	0,000
100	0,341	0,292	0,119	0,239	0,205	0,003	0,007	0,007	0,010	0,007	0,123	0,043
125	0,045	0,045	0,051	0,067	0,018	0,014	0,016	0,008	0,015	0,010	0,029	0,007
160	-	-	-	-	-	0,019	0,020	0,015	0,015	0,018	0,017	0,001
200	0,008	0,016	0,026	0,023	0,038	0,019	0,023	0,015	0,019	0,018	0,021	0,003
250	0,021	0,021	0,018	0,025	0,020	0,018	0,023	0,017	0,019	0,018	0,020	0,001
315	0,024	0,026	0,024	0,030	0,024	0,027	0,030	0,024	0,027	0,025	0,026	0,001
400	0,028	0,029	0,029	0,030	0,027	0,025	0,026	0,023	0,024	0,024	0,027	0,001
500	0,031	0,032	0,030	0,030	0,031	0,027	0,026	0,023	0,024	0,027	0,028	0,001
630	0,034	0,032	0,033	0,031	0,032	0,024	0,028	0,022	0,021	0,028	0,029	0,001
800	0,041	0,039	0,040	0,041	0,041	0,026	0,055	0,024	0,025	0,031	0,036	0,003
1000	0,049	0,050	0,047	0,050	0,047	0,039	0,156	0,035	0,042	0,050	0,057	0,011
1250	0,064	0,060	0,061	0,066	0,061	0,074	0,141	0,065	0,088	0,079	0,076	0,008
1600	0,096	0,098	0,104	0,081	0,103	0,099	0,101	0,102	0,137	0,101	0,102	0,004
2000	0,186	0,185	0,244	0,110	0,237	-	-	-	-	-	0,192	0,016
2500	0,444	0,386	0,440	0,298	0,426	-	-	-	-	-	0,399	0,018
3150	0,264	0,318	0,226	0,447	0,250	-	-	-	-	-	0,301	0,026
4000	0,148	0,166	0,167	0,260	0,178	-	-	-	-	-	0,184	0,013
5000	0,269	0,291	0,327	0,505	0,305	-	-	-	-	-	0,339	0,028
6300	0,810	0,733	0,891	0,930	0,866	-	-	-	-	-	0,846	0,023

PŘÍLOHA P X - GRAFICKÁ ZÁVISLOST KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI NA FREKVENCI PRO POLYVINYLCHLORID (TL. 3 MM)

