

Polyuretany a jejich využití v technické akustice

Veronika Struhařová

Bakalářská práce
2008



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav fyziky a mater. inženýrství

akademický rok: 2007/2008

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Veronika STRUHAŘOVÁ**

Studijní program: **B 2808 Chemie a technologie materiálů**

Studijní obor: **Chemie a technologie materiálů**

Téma práce: **Polyuretany a jejich využití v technické akustice.**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování teoretické části na základě zadáných literárních zdrojů.
2. Zpracování základních informací o akustických veličinách použitých v technické akustice.
3. Výběr materiálů na bázi polyuretanů a jejich technický popis.
4. Měření akustických veličin.
5. Vyhodnocení a závěr.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. KLEPNER/FRISCH; POLYMERIC FOAMS; ISBN 0-19-520929-X
2. DOC. ING. VOJTĚCH MIŠUN, CSC.; VIBRACE A HLUK; ISBN 80-214-1262-3
3. CTIRAD SMETANA A KOLEKTIV; HLUK A VIBRACE (MĚŘENÍ A HODNOCENÍ); ISBN 80-901936-2-5
4. B.MEISSNER, V.ZILVAR; FYZIKA POLYMERŮ (STRUKTURA A VLASTNOSTI POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ); ISBN 04-634-87
5. MARIE VAŇKOVÁ A KOLEKTIV; HLUK VIBRACE A IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ V ŽIVOTNÍM A PRACOVNÍM PROSTŘEDÍ (ČÁST 1); ISBN 80-241-0695-X
6. DOC. RNDR. MARIE VAŇKOVÁ, CSC. A KOLEKTIV; HLUK VIBRACE A IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ V ŽIVOTNÍM A PRACOVNÍM PROSTŘEDÍ (ČÁST 2); ISBN 80-241-0818-9
7. DOC.ING.ĽUBOMÍR LAPČÍK, CSC., DOC.RNDR.MIROSLAV RAAB, CSC.; NAUKA O MATERIÁLECH II; ISBN 80-238-6527-7

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Juříčka

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

11. února 2008

Termín odevzdání bakalářské práce:

4. června 2008

Ve Zlíně dne 11. února 2008


doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan




prof. Ing. Lubomír Lapčík, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce byla zaměřena na zjištění akustických vlastností jednoho druhu polyuretanové pěny a jejich povrchových variant. Z akustických veličin byly měřeny koeficienty zvukové pohltivosti, odrazivosti a hladiny akustického tlaku.

Práce byla rozdělena na dvě hlavní části. V první části byly vysvětleny základní akustické veličiny a zákonitosti šíření zvuku. Druhá část se věnuje vybranému pórovitému materiálu s různorodými povrchy. Druhou část doplňuje popis vlastního měření. V závěrečné části jsou zhodnoceny naměřené veličiny a získaná data.

Cílem práce bylo poskytnout údaje, na jejichž základě může být tento materiál vhodně použit v technické akustice.

Klíčová slova: koeficient zvukové pohltivosti, koeficient zvukové odrazivosti, hladina akustického tlaku, frekvence, vlnová délka, akustika, zvuk, hluk.

ABSTRACT

This bachelor work was focused on finding (investigation) acoustic characteristics of polyurethane foam and their surfaces. Sound absorption coefficients, sound reflection coefficients and sound pressure levels were chosen from acoustic values (quantity) and were measured.

The work was separated into two general parts. Fundamental acoustic values and patterns of sound transmission were explained in the first block. The second block was dedicated to selected porous material and measurements. Description and results of measurement was placed in the two blocks.

The aim of this bachelor work was provided data for appropriate using of these materials in acoustic applications.

Keywords: sound absorption coefficient, sound reflection coefficient, sound pressure level, frequency, wave length, acoustic, sound, noise

Poděkování

Ráda bych tímto poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Martinu Juříčkovi, Ph.D. za ochotu, cenné rady a trpělivost s jakou mně při tvorbě bakalářské práce vedl.

Prohlašuji, že jsem na bakalářské/diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem citoval(a). V případě publikace výsledků, je-li to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uveden(a) jako spoluautor(ka).

Ve Zlíně

.....

Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD.....	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 AKUSTIKA	10
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY V AKUSTICE	10
1.1.1 Zvuk	10
1.1.2 Hluk.....	11
1.2 ZVUK A ČLOVĚK	12
1.2.1 Vnímání zvuku	12
1.2.2 Vliv hluku na životní prostředí a na člověka.....	13
1.3 ZÁKLADNÍ VELIČINY V AKUSTICE	14
1.3.1 Vlnová délka; λ [m].....	14
1.3.2 Akustický tlak; p [Pa].....	15
1.3.3 Rychlost šíření akustických vln; c [m.s ⁻¹]	16
1.3.4 Akustická rychlost; v [m.s ⁻¹]	17
1.3.5 Akustický výkon; P [W].....	17
1.3.6 Akustická intenzita; I [W.m ⁻²]	18
1.3.7 Měrná akustická impedance prostředí; Z [N.s.m ⁻³].....	19
1.4 DECIBELOVÉ VELIČINY	19
1.5 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI A ŠÍŘENÍ ZVUKU.....	21
1.5.1 Absorpce zvuku ve vzduchu	21
1.5.2 Zvuk na rozhraní fází	21
1.5.3 Pohlcování zvuku	24
1.5.4 Snižování hluku.....	26
1.5.5 Technická akustika.....	26
2 PÓROVITÉ SOUSTAVY	27
2.1 PÓROVITÉ MATERIÁLY.....	27
2.1.1 Polyuretany.....	28
2.2 VLASTNOSTI PÓROVITÝCH AKUSTICKÝCH MATERIÁLŮ	31
2.2.1 Poróznost, Y [-]	33
2.2.2 Umístění vzorků v Kundtově trubici.....	33
II PRAKTICKÁ ČÁST	36
3 POPIS MĚŘENÍ	37
3.1 MĚŘENÉ AKUSTICKÉ VELIČINY	37
3.2 VZORKY MATERIÁLŮ POUŽITÉ K MĚŘENÍ.....	37
3.3 POUŽITÉ MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ A METODY MĚŘENÍ.....	38
3.3.1 Měření činitele zvukové pohltivosti.....	38
3.3.2 Prostředí PULSE	40
3.3.3 Výpočty	42
3.3.4 Značení vzorků.....	43

3.4	NAMĚŘENÉ HODNOTY AKUSTICKÉ POHLTIVOSTI A ODRAZIVOSTI.....	44
3.5	NAMĚŘENÉ HODNOTY HLADIN AKUSTICKÉHO TLAKU	48
	ZÁVĚR	52
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	54
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	56
	SEZNAM OBRÁZKŮ	58
	SEZNAM TABULEK.....	60

ÚVOD

Zvuk nás obklopuje a provází celým životem každou vteřinu. Prostřednictvím sluchu může člověk a živočichové, kteří mají vyvinutý orgán pro vnímání sluchu, získávat a vlastně přijímat obrovské množství informací.

Od té doby se méně či více intenzivním studiem tyto znalosti a také znalosti nežádoucích akustických signálů neboli hluků prohloubily a jsou předmětem hlavně inženýrského zájmu. V dnešní době, která klade stále vyšší nároky na kvalitu života a ochranu životního prostředí, má studium akustiky stále velký význam. Ve vyspělých státech světa existují rozsáhlé výzkumné programy, které se zabývají zvuky, jež jsou generovány stroji různého typu. Z hlediska ochrany životního prostředí se hluk řadí hned za znečištění ovzduší a ochranu povrchových vod. Také velké podniky již dnes mají týmy inženýrů specialistů, kteří aplikují základní teoretické poznatky do praxe. Přesnost strojů a kvalita strojních zařízení totiž úzce souvisí s jejich hlučností. Hlučné stroje se obtížněji prodávají a to se projevuje i v podstatně nižších cenách. Nadměrný hluk proto zabírá v řadě faktorů ovlivňujících naše prostředí stále dominantnější roli.

Akustika se zabývá spoustou problémů a témat. Od vlastností šíření zvukové vlny v různých prostředích přes vznik a vnímání zvuku až po vlastnosti zvukových jevů v otevřených nebo uzavřených prostorech. Aktuálně se jedna z částí intenzivního výzkumu zabývá problematikou zvukových izolací, obzvláště tzv. pórovitými materiály. Avšak nezáleží pouze na akustických vlastnostech materiálu, je tu spousta dalších faktorů, jež ovlivňují jeho výrobu a použití. A v neposlední řadě musíme brát samozřejmě v úvahu, že se tyto materiály většinou nepoužívají samostatně, ale v kombinaci s jinými např. konstrukčními. Je tedy užitečné znát akustické a další vlastnosti.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 AKUSTIKA

Jedním z četných oborů fyziky je akustika. Spolu s mechanikou a optikou ji řadíme k nejstarším částem. Akustika se zabývá fyzikálními ději, jako jsou mechanické kmity, vznik zvukového vlnění a jeho šíření a taky biologickými procesy [1].

1.1 Základní pojmy v akustice

1.1.1 Zvuk

Zvuk je přirozeným projevem v přírodě, tedy i v životě člověka. Zvuk vnímáme lidským uchem, který patří k pěti smyslům člověka a je jedním z informačních zdrojů. Zvuk je tak velmi účinný poplašný systém [1].

Mechanické vlnění se šíří v pružném prostředí ve frekvenčním rozsahu, které odpovídá kmitočtovému rozsahu lidského ucha tj. frekvenčnímu pásmu cca 16 – 20 000 kmitů za sekundu, které označujeme jako zvuk. Rychlost šíření zvuku ve vzduchu 340 m/s, ve vodě 1500 m/s, v oceli 5000 m/s od místa rozruchu [1].

Jeho základní příčinou je pohyb částic v pružném prostředí. Rozlišujeme tři pásma frekvence: infrazvuk, slyšitelné pásmo a ultrazvuk. Zdrojem zvuku je takové místo, kde vzniká akustická energie. Tato energie se zvukem šíří do okolního prostředí (kapalného i vzdušného) [2].

Dvě příčiny vzniku akustické energie jsou [2]:

- *Mechanický zvuk* - mechanické kmity povrchu stojů, stěn budov, technologických zařízení a jejich částí.
- povrchy kmitajících těles způsobují rozruchy v kapalném nebo plynném prostředí, ty svou mechanickou energii odevzdávají akustickému prostředí.
- záleží na rozměru, tvaru a povrchu jeho kmitání, které souvisí s akustickou energií.
 - *Aerodynamický zvuk* - nestacionární proudění kapalné nebo plynné látky
- neustálé proudění plynu nebo kapaliny s výraznými změnami tlaku, kde dochází k vlnění příslušného média (ventilátory, kompresory, výfuky, aj.).

Zvuk se šíří v pevných, kapalných i plynných látkách ve formě akustického vlnění. Ve volném prostoru se šíří od zdroje všemi směry. Vlnění jde od zdroje ve vlnoplochách tj.

spojnice zvukového pole, která má v daný okamžik stejné parametry. Vlny se mohou v prostoru lámat, ohýbat, odrážet nebo sčítat s jinými vlnami [2].

V homogenním prostředí se vlnění šíří přímočaře. Vlnění se dělí na podélné a příčné, podle toho, zda částice v prostředí kmitají ve směru šíření vlnění nebo kolmo k němu. U podélného vlnění je směr kmitů jednoznačně dán směrem šíření vln, u příčného musíme udávat také rovinu kmitů. Pokud se všechny kmity dějí v jedné rovině, jde o lineárně polarizovatelné vlnění. Částice se jednosměrně nepohybují, pouze kmitají kolem svých rovnovážných poloh [2].

U kapalin a plynů se vyskytuje pouze podélné vlnění, tyto látky jsou pružné ve smyslu objemové stlačitelnosti. Toto vlnění se šíří ve směru vlny a charakterizuje zředování a zhušťování prostředí. U elastických materiálů se vyskytuje jak podélné, tak i příčné vlnění. Obě tyto vlnění vykazují pružnost jak v tlaku, tak i v tahu, ale i ve smyku. Kombinací těchto deformací vzniká ohybové kmitání prutů a desek. Ve vakuu se zvuk nešíří [2].

1.1.2 Hluk

Hlukem označujeme jakýkoliv nežádoucí zvuk. Záleží na fyzickém i psychickém stavu člověka a jeho vnímání zvuku. Zvuk proto může být příjemný, který nevadí našemu uchu, ale i nepříjemný. A to nejen svou intenzitou, ale i svým charakterem. Pro jednoho člověka může být zvuk hlukem, ale pro jiné lidi může být zároveň důležitým zdrojem informací nebo může být i dokonce příjemný na poslech. Silný a zbytečný hluk ruší, nepříjemňuje pobyt a práci člověka, případně ohrožuje jeho zdravotní stav [2].

Mezi hluk patří i neperiodické zvuky jako vrzání, skřípání, praskot. Zvláštním případem je šum, který v podstatě doprovází všechny sluchové vjemy člověka. Jednou ze základních vlastností zvuku a samozřejmě také hluku je, že se šíří na poměrně velké vzdálenosti. Za určitých podmínek se akustické vlnění může odrážet, lomit a ohýbat [2].

Podle kolísání úrovně hluku rozeznáváme [2]:

- *Ustálený hluk* – hladina hluku se v jednom místě s časem nemění o více než 6 dB.
- *Proměnlivý hluk* – hladina hluku se mění v místě a čase o více než 6 dB.
 - *Kolísavý hluk* – hladina hluku se s časem plynule mění.

- *Přerušovaný hluk* – hladina hluku se mění náhle v trvajících časových pásmech.
- *Impulsový hluk* – hluk je vysílán jednorázově, nebo v opakujících se časových intervalech kratších než 300 ms.

V našem okolí působí několik zdrojů hluku. Obklopují nás tak, že není možné přesně určit, kde jsou tyto zdroje umístěny. Ve velkých vzdálenostech vnímáme tedy tento zvuk nebo spíše hluk jako šum. Jiným příkladem je šum v lese. Tady je šum vyvolaný nepravidelným pohybem listů všech stromů [2], [13], [14].

1.2 Zvuk a člověk

1.2.1 Vnímání zvuku

Zvuk vnímá člověk přes sluchový orgán - ucho. Zvuk používáme proto, abychom mohli získat informace o prostředí, ve kterém žijeme a které nás obklopuje. Člověk i zvířata vnímají zvuk jinak, jako třeba u dalších fyzikálních jevů jako je například teplota, osvětlení. Netopýr používá echolokaci, aby věděl, jestli má před sebou nějakou překážku nebo predátora [1].

Vnímání zvuku závisí na mnoha faktorech [3].

- *Frekvenční rozsah* – většina lidí začne vnímat zvuk od 20 Hz - 20 000 Hz, každý člověk vnímá zvuk jinak a s rostoucím věkem hranice slyšitelnosti klesá.
- *Dynamický rozsah* – rozdíl mezi nejnižším a nejhlasiťjším vnímaným zvukem.
- *Frekvenční maskování* – pokud znějí dva tóny současně, může jeden z nich potlačit slyšitelnost a my vnímáme zvuk jako jeden tón.

Weber – Fechnerův fyziologický zákon popisuje kvantitativně lidské vjemy a zní takto [1]:

Hlasitost daného tónu roste aritmetickou řadou, roste-li jeho fyzikální intenzita logaritmickou řadou.

$$L_N = konst. \log \frac{I}{I_0} \quad (1)$$

kde: L_N – hladina hlasitosti [dB],

I – intenzita vnímaného zvuku [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$],

I_0 – referenční intenzita zvuku [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$].

Konstanta úměrnosti závisí na frekvenci tónu. Pro tón o kmitočtu 1000 Hz lze psát [1]:

$$L_N = 10 \log \frac{I}{I_0} = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (2)$$

kde: p – akustický tlak v pásmu [Pa],

p_0 – referenční akustický tlak [Pa].

Při této frekvenci jsou si číselně rovny hladina hlasitosti L_N [dB] a hladina akustického tlaku. Pro ostatní kmitočty je třeba hladinu hlasitosti stanovit v porovnání se zvukem o frekvenčním kmitočtu 1000 Hz [1].

1.2.2 Vliv hluku na životní prostředí a na člověka

Nadměrný hluk zaujímá jedno z předních míst v řadě faktorů ohrožujících naše životní prostředí. Vývoj techniky směřuje ke stálému zvyšování výkonů strojů a technologických zařízení, ale také přímo úměrně k nárůstu hlučnosti. Řešení této situace se stává jednou z priorit, stejně jako znečištění ovzduší a ochrana vodních zdrojů, v programech ochrany životního prostředí. Nejvíce se tato nepříjemná situace projevuje v pracovním a obytném prostředí člověka a také v dopravě. Nezanedbatelný vliv na hlukovou situaci má i moderní reprodukováná hudba. Aktivity různých orgánů a spolků, které věnují pozornost ochraně životního prostředí, vedly občany k většímu zájmu o tiché prostředí a k zálibě vlastnit tichá domácí zařízení [1].

Jednou z nejzávažnějších vlastností zvuku a také samozřejmě je, že se šíří na poměrně velké vzdálenosti. Při tom se šíří stejně dobře vzduchem i vodou nebo pevnou hmotou, např. konstrukcí stavby. V důsledku tohoto jevu působí hluk na každého, kdo je v dosahu akustické energie. Postihuje tedy nejen toho, kdo zdroj zvuku popřípadě hluku způsobuje, ale i osoby, které nemají se zdrojem nic společného a pro něž je hluk nežádoucí a zbytečný. Nárůst hlučnosti v našem životním prostředí je cca 1 dB za rok. Nebezpečí spočívá zejména ve skutečnosti, že lidský organismus nemá prakticky proti působení hluku

a s ním spojených vibrací výraznější obranné mechanismy. V dnešní době se různá pracoviště zabývají problémy snižování hluku a vibrací [1].

Základním parametrem hluku, určujícím jeho účinek na člověka, je intenzita, případně akustický tlak. Lidské ucho zachytí zvuky se širokým rozsahem amplitud. Člověk se necítí dobře v prostředí, kde je nízká hladina hluku. Většina lidí považuje 20 dB za hluboké ticho a taky za nepříjemný stav. Při dlouhodobém vystavení hladiny hluku 85 dB se může trvale poškodit ucho. Při hladině 130 dB se účinky hluku mění na bolest a nad 160 dB dochází k protržení bubínku [1].

Obtěžující účinky hluku závisí i na dalších faktorech jako jsou frekvence, doba trvání a šířka frekvenčního pásma, rozdíl mezi hlukem zdroje a hlukem pozadí, na osobních dispozicích člověka a jeho vztahu ke zdroji hluku. Nejčastějším projevem poškození sluchového orgánu je trvalý posun sluchového prahu slyšitelnosti. Mezi škodlivé účinky se řadí dále podráždění vegetativního a nervového systému, projevující se zvýšenou tepovou frekvencí srdce, zvýšením krevního tlaku, zhoršením látkové výměny, stres, poruchy spánku (hloubka, doba), narušení regeneračních pochodů v organismu, psychické poruchy, podrážděnost, apatie, nervozita, snížení pozornosti a reakčního času [1].

1.3 Základní veličiny v akustice

1.3.1 Vlnová délka; λ [m]

Vlnová délka je vzdálenost mezi dvěma nejbližšími body, které mají v daném okamžiku stejný akustický stav, nebo vzdálenost, kterou urazí zvuková vlna za dobu jednoho kmitu T . Vlnovou délku lze tedy vyjádřit rovnicí [2]:

$$\lambda = vT = \frac{v}{f} \quad (3)$$

kde: v - rychlost šíření vlnění v daném prostředí [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

T - doba jednoho kmitu nebo periody [s],

f - frekvence vlnění [Hz].

1.3.2 Akustický tlak; p [Pa]

Při šíření vlnění v plynném nebo kapalném prostředí se celkový tlak mění. Zde také tlak kolísá okolo původního statistického nebo barometrického tlaku v ovzduší (Obr. 1.). Za zvýšení či snížení tlaku odpovídá zhušťování a zřed'ování prostředí. Za akustický tlak je považována výchylka celkového tlaku od statického tlaku v daném prostředí. Akustický tlak při vlnění o frekvenci f a fázovém posuvu φ má tvar harmonické funkce [2]:

$$p_c = p_b + p(t) \quad (4)$$

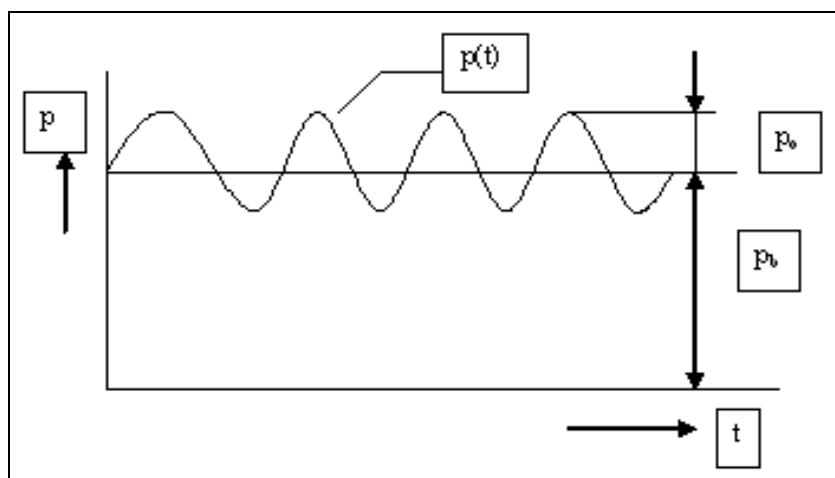
kde: p_c - celkový tlak [Pa],

p_b - barometrický tlak [Pa].

$$p(t) = p_0 * \cos(\omega * t + \varphi) \quad (5)$$

kde: p_0 - amplituda akustického tlaku,

φ - fázový posun.



Obr. 1. Kolísání akustického tlaku okolo barometrického

Efektivní hodnotu akustického tlaku p_{ef} zavádíme z důvodu jeho časové proměnlivosti [2]:

$$p_{ef} = \frac{p_0}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

Lidské ucho je tedy citlivé na změnu tlaku vzduchu i na jeho výchylky. Je-li změna tlaku s frekvencí nad 16 Hz, slyší je člověk jako zvuk. Mladý člověk zaznamená i velmi malou výchylku akustického tlaku cca 20 μ Pa. Ta je v porovnání s barometrickým tlakem, který má hodnotu přibližně 101,3 $\cdot 10^3$ Pa, nepatrná [2].

1.3.3 Rychlost šíření akustických vln; c [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

V kapalinách a plynech se šíří pouze vlnění podélné, které je spojeno se zhušťováním a zředováním prostředí. Tomu odpovídá proměnný akustický tlak. Pomocí indexů rozlišujeme jednotlivé rychlosti pro vlnění podélné, příčné i ohybové [1].

- c_L - vlnění podélné
- c_T - vlnění příčné
- c_B - vlnění ohybové

Ohybové vlnění je kombinací příčného a podélného vlnění a vzniká u tyčí a desek. Šíření rychlosti je závislé na elastických vlastnostech prostředí, kterým se vlnění šíří [2]:

- *pro pevné látky:*

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (7)$$

kde: E - modul pružnosti materiálu v tahu [Pa],

ρ - hustota prostředí [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$].

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (8)$$

kde: G - modul pružnosti materiálu ve smyku [Pa],

ρ - hustota prostředí [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$].

- *pro tekutiny:*

$$c = c_l = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (9)$$

kde: K - modul objemové pružnosti (stlačitelnosti) tekutiny [Pa],

ρ - hustota prostředí [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$].

- *pro plyny lze pak vztah upravit:*

$$c = c_l = \sqrt{\mu \frac{P_b}{\rho}} \quad (10)$$

kde: μ - Poissonova konstanta [-],
 p_b - barometrický tlak [Pa],
 ρ - hustota prostředí [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$].

Rovnice č. 10 se v praxi příliš nepoužívá, protože když stoupne atmosférický tlak p , úměrně stoupne hustota vzduchu ρ . Stoupne-li v určitém místě teplota, klesne v témže místě hustota vzduchu ρ , zde se barometrický tlak nemění. Z toho vyplývá, že zvýšení rychlosti zvuku je úměrné s teplotou. Proto se pro rychlost zvuku ve vzduchu používá vztahu [2]:

$$c = c_t = c_0 + k * t \quad (11)$$

kde: c_0 - rychlost zvuku při 0° celsia; 331,8 [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
 k - koeficient změny rychlosti; 0,6 [-],
 t – teplota [$^{\circ}\text{C}$].

1.3.4 Akustická rychlost; v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

Akustická rychlost je rychlost kmitajících jednotlivých částecek v prostředí, kterým se šíří akustická vlna. Výraz výpočtu získáme parciální derivací akustické výchylky podle času [2]:

$$v = \frac{\partial u}{\partial \tau} = \varpi * u_0 * \cos \omega \left(\tau \pm \frac{x}{c} \right) \quad (12)$$

Součin amplitudy výchylky a kruhové frekvence dává amplitudu akustické rychlosti. Tedy v je součinem ω a u_0 . Akustická rychlost je jednou z nejdůležitějších akustických veličin a je jí nutno odlišovat od rychlosti šíření zvuku. Její velikost je o mnoho řádů menší než rychlost šíření zvuku [2].

1.3.5 Akustický výkon; P [W]

Mechanickými kmity se přenáší energie kmitajících částic od zdroje prostřednictvím akustických vln. Každý zdroj hluku je definován akustickým výkonem. Čím větší část energie ΔE se za dobu Δt přenese myšlenou prostorovou plochou S ze zdroje do uvažovaného místa, tím je akustický výkon vlnění větší [2].

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (13)$$

Akustický výkon zdroje je důležitým absolutním parametrem při hodnocení a srovnávání akustických zdrojů. Použití akustického výkonu k popisu zdroje zvuku je výhodnější než definování zdroje akustickým tlakem. Akustický výkon lze vyjádřit i vztahem [2]:

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v} = F \cdot v = p \cdot v \cdot S \quad (14)$$

kde: v - rychlost kmitání částic; akustická rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

p - akustický tlak [Pa],

S - plocha [m^2].

1.3.6 Akustická intenzita; I [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

Akustická veličina, která je vztažená k akustickému výkonu je akustická intenzita zvuku. Intenzitu můžeme vyjádřit vztahem [2]:

$$I = \frac{\Delta P}{\Delta S} \quad (15)$$

kde: P - akustický výkon [W],

S - plocha [m^2].

Akustická intenzita popisuje množství a směr toku akustické energie v daném místě prostředí. Můžeme ji vyjádřit jako vektorovou veličinu. Směr šíření akustického vlnění určuje směrnost. Kolmo na směr vlnění je akustická intenzita rovna nule. Akustickou intenzitu můžeme ještě vyjádřit [2]:

$$I = p_{ef} \cdot v_{ef} = \frac{p_{ef}^2}{\rho \cdot c} \quad (16)$$

kde: p_{ef} - efektivní hodnota akustického tlaku [Pa],

v_{ef} - efektivní hodnota rychlosti kmitajících částic [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

ρ - hustota prostředí [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

c - rychlost šíření akustické vlny [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

1.3.7 Měrná akustická impedance prostředí; Z [$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$]

Akustická impedance, nebo-li vlnový odpor akustického prostředí [2]:

$$Z = \rho \cdot c = \frac{p}{v} \quad (17)$$

kde: p - akustický tlak [Pa],

v - hodnota rychlosti kmitajících částic [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

ρ - hustota prostředí [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],

c - rychlost šíření akustické vlny [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

Pro rovinnou akustickou vlnu, u které je poměr mezi akustickým tlakem a akustickou intenzitou konstantní, lze akustickou impedanci vyjádřit vztahem [2]:

$$Z = \frac{\check{p}_0}{\check{v}_0} \quad (18)$$

kde: \check{p}_0, \check{v}_0 - jsou komplexní amplitudy příslušných akustických veličin.

V obecném případě je tedy akustická impedance komplexní veličina [2].

1.4 Decibelové veličiny

Sluchem můžeme vnímat při referenčním kmitočtu i zvuky o velmi malém akustickém výkonu, nebo lépe o velmi malé akustické intenzitě. Práh slyšení určuje hodnota tohoto výkonu o velikosti 10^{-12}W , respektive $10^{-12}\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Práh bolesti představují zvuky, o výkonu větším než 1W . Poměr největšího a nejmenšího akustického výkonu zvuku v oblasti největší citlivosti ucha je tedy 10^{12} , a je tedy značný. Proto se tento poměr vyjadřuje v logaritmické stupnici a v jednotkách bel - B, přestože je tato hodnota hladiny bezrozměrná. Prahu bolesti odpovídá hodnota 12B. V praxi se ale používá jednotka ještě desetkrát menší než bel a tou je decibel, dB. V decibelech vyjádříme poměr referenčního akustického výkonu W_0 daného zvuku ke sledovanému akustickému výkonu W , který určuje práh slyšení, jako hladinu akustického výkonu. Každému zvýšení akustického výkonu o jeden řád odpovídá zvýšení akustického výkonu o 10 dB [1].

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (19)$$

Práh slyšení odpovídá v této stupnici 0 dB a práh bolesti 120 dB.

Akustické hladiny jsou vlastně vyjádřením Weberova – Fechnerova zákona pro daný případ. Často používanými hladinami jsou hladina akustického tlaku a hladina akustické intenzity. Pro základní měření objektivních hladin se používá měření hladiny intenzity nebo hladiny akustického tlaku, které si jsou zcela rovnocenné a dávají stejné číselné hodnoty [1].

Hladina akustické intenzity je označována značkou L_I a výraz pro ni je analogický s hladinou akustického výkonu [1]:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (20)$$

kde: I - hodnota intenzity zvuku,

I_0 - referenční hodnota intenzity stanovená dohodou na $10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$.

Dosadíme-li z rovnice č. 16 pro akustickou intenzitu a místo p_{ef} budeme psát prostě p , dostáváme výraz pro hladinu akustického tlaku [1]:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (21)$$

<i>Charakteristika hluku</i>	<i>Akustický tlak p (Pa)</i>	<i>Hladina akust. tlaku L_p (dB)</i>
Práh slyšení	0,000 020	0
Tichý les	0,000 100	15
Obývací pokoj	0,002 000	40
Psaní na stroji	0,020 000	60
Automobil	0,400 000	85
Pneumatická vrtačka	2,000 000	100
Tryskové letadlo	60,000 000	130
Práh bolesti	100, 000 000	135

Tab. 1. Rozdíl velikostí akustického tlaku a hladin akustického tlaku v závislosti na změně prostředí

1.5 Fyzikální vlastnosti a šíření zvuku

Zvuk, šířící se vlněním částic příslušného reálného prostředí, nejčastěji vzduchem, je vedle poklesu akustické intenzity se vzdáleností ovlivňován řadou dalších faktorů. Mezi ně například patří rychlostní a teplotní gradienty akustického prostředí, které mění směr akustického vlnění a jeho rychlost. Viskozita tekutiny způsobuje pohlcování části akustické energie, tedy absorpci vlnění. Vzduch tedy upravuje spektrum hluku, stejně jako snižuje jeho intenzitu a pozměňuje cestu jeho šíření [2].

1.5.1 Absorpce zvuku ve vzduchu

Absorpce zvuku ve vzduchu se mění s frekvencí, vlhkostí a teplotou podle poměrně složitých vztahů. Zvýšené absorpce zvuku jsou při nižších frekvencích, při zvyšující se teplotě a při vyšší relativní vlhkosti vzduchu. Maximální útlum zvuku absorpcí je při relativních vlhkostech cca 10 až 20%, tedy poměrně malý [1], [2].

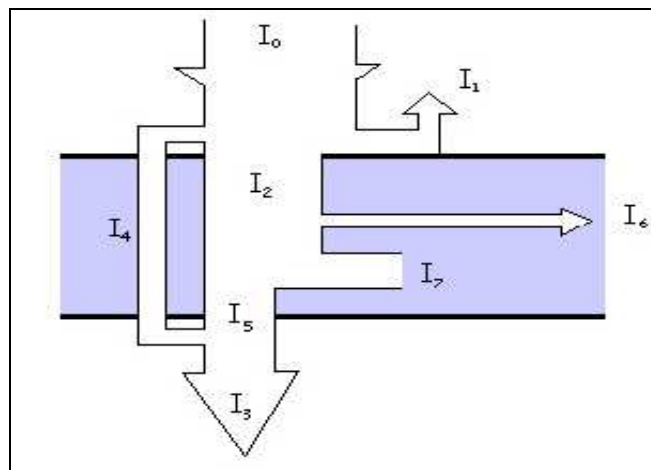
1.5.2 Zvuk na rozhraní fází

Při dopadu akustické vlny na rovinnou plochu, která má ideální odrazivost, se tato vlna od roviny odráží obdobně, jako se odráží světelný paprsek od zrcadla. Důvodem, proč hudba, zpěv nebo mluvené slovo je v uzavřené místnosti silnější a srozumitelnější než v otevřeném prostoru, je skutečnost, že zvuk, který vychází ze zdroje, se po dopadu odráží od stěn a předmětů a v podstatě vyplní více či méně rovnoměrně celý prostor místnosti.

Akustická energie pak neuniká do prostoru, a tudíž člověk vnímá větší hlasitost zvuku. Pokud se prostor vyplní akustickou energií rovnoměrně, vzniká homogenní akustické pole, nazývané difúzní, nebo ozvukové [1].

Prakticky však při každém dopadu akustické vlny na rozhraní dvou homogenních prostředí, které nejčastěji tvoří vzduch a pevné látky, dochází k neúplnému odrazu, tedy část akustické energie se odrazí a část vnikne do druhé látky [1].

Co se však děje s akustickou energií při dopadu na rozhraní fází je nejlépe vidět na (Obr. 2.), kde jsou jednotlivé složky zvuku vyjádřeny pomocí intenzity zvuku, tedy jako akustický výkon dopadající na 1m^2 stěny [1].



Obr. 2. Akustická vlna na rozhraní plynné a pevné fáze (rozhraní vzduch x pevná látka)

Intenzita zvuku I_0 se rozdělí na tyto části:

- I_1 – intenzita zvuku vlny odražené.
- I_2 – intenzita zvuku vlny pohlcené.
- I_3 – intenzita zvuku vlny vyzářené za stěnu celkem.
- I_4 – intenzita zvuku vlny prošlé za stěnu otvory a póry.
- I_5 – intenzita zvuku vlny, kterou stěna vyzáří v důsledku svého ohybového kmitání do druhého poloprostoru.
- I_6 – intenzita zvuku vlny, která je vedená ve formě chvění do ostatních částí přiléhajících konstrukcí.
- I_7 – intenzita zvuku přeměněná ve stěně na teplo.

V relativním vyjádření zavádíme [1]:

- činitele zvukové odrazivosti r :

$$r = \frac{I_1}{I_0} \quad (22)$$

- činitele zvukové pohltivosti α :

$$\alpha = \frac{I_2}{I_0} \quad (23)$$

Potom musí platit, že:

$$r + \alpha = 1 \quad (24)$$

Podíl odraženého a procházejícího vlnění závisí na úhlu dopadu vlny (úhel incidence) na rozhraní, na rychlostech zvuků a hustotách obou prostředí. Absorpce povrchu různých materiálů je funkcí mnoha parametrů a velikost činitele zvukové pohltivosti α závisí na efektivní drsnosti materiálů, jeho pórovitosti a poddajnosti. Větší pohltivost mají materiály pórovité (děrované panely, některé měkké polymery ap.). V mezním případě, kdy $\alpha = 0$, je pohltivost materiálu nulová a veškerá akustická energie se odráží zpět. V opačném případě, kdy $\alpha = 1$, je všechna akustická energie pohlcena druhým prostředím [13], [14].

Dále můžeme zavést [1]:

- součinitel zvukové průzvučnosti τ

$$\tau = \frac{I_3}{I_0} \quad (25)$$

Rozdělení dopadající akustické energie (Obr. 2.) nám definuje i další veličinu nazývanou činitel přeměny [1]:

- činitel přeměny ε :

$$\varepsilon = \frac{I_7}{I_0} \quad (26)$$

Ten vyjadřuje podíl mezi energií přeměněnou ve stěně na teplo a energií na stěnu dopadající. Pokud je tedy použit materiál nebo konstrukční díl, v němž je intenzita zvuku vlny, která je vedená ve formě chvění do ostatních částí přiléhajících konstrukcí nulová ($I_6=0$), můžeme psát že [1]:

$$r + \tau + \varepsilon = 1 \quad (27)$$

a

$$\alpha = \varepsilon + \tau \quad (28)$$

Jestliže tedy nastane případ, kdy nám bude záležet na kvalitě prostorové akustiky, nemusíme se zajímat o to, co se stane s energií pohlcenou, ale o energii, která se od stěny po dopadu vrací zpět do místnosti. Ovšem při otázce snižování hluku je to právě obráceně a více nás tedy zajímá energie stěnou (látkou) pohlcená. Zde je snaha, aby tato pohlcená energie byla co nejnižší a okolní místnosti a prostory byly od hlučného prostředí izolovány [1].

Činitel pohltivosti α pro všesměrový dopad zvukových vln je větší než pro kolmý dopad zvukových vln, protože při stejné hustotě zvukové energie dopadá při všesměrovém dopadu na tutéž plochu mnohem více zvukové energie než při dopadu kolmém a tedy i velikost pohlcené energie je větší [1], [2].

1.5.3 Pohlcování zvuku

Pojmem pohlcování zvuku je vysvětlována přeměna akustické energie v jinou, obvykle tepelnou. Akustický výkon zvukové vlny W_i , která dopadne na stěnu, z části odražen a z části pohlcen, tak jak je zobrazeno na (Obr. 2.) [13], [14].

Vzájemný poměr jednotlivých složek akustického výkonu závisí na mechanických vlastnostech stěny nebo konstrukce. Mechanické vlastnosti tedy ovlivňují vlastnosti akustické – zvuková pohltivost, vzduchová neprůzvučnost aj. [13], [14].

Schopnost konstrukce pohltit část akustického výkonu dopadající zvukové vlny popisuje činitel zvukové pohltivosti α . Činitel zvukové pohltivosti je vyjádřen poměrem akustického výkonu pohlceného k celkovému akustickému výkonu [13], [14].

$$\alpha = \frac{W_a}{W_i} \quad (29)$$

Každý materiál má jinou hodnotu činitele α , který je závislý i na úhlu dopadu a kmitočtu vlnění. Při odrazu akustické vlny platí, že úhel dopadu se rovná úhlu odrazu. Z důvodu dobrého pohlcování zvukové vlny je velmi důležitá pórovitost materiálu. Když zvuk pronikne do póru, začne se odrážet od jeho stěn a při každém odrazu ztratí část své

energie. Tím dochází ke snižování jeho intenzity. Vedle množství pórů je důležitý jejich tvar a velikost [13], [14].

K úbytku zvukové energie dochází v podstatě trojím způsobem [15]:

- *Třením rozkmitaných částic vzduchu o stěny.*

Při jejich vnikání do pórů pohltivého materiálu dochází ke snižování kinetické energie dopadajícího zvukového pole. Vlastní tlaková ztráta třením v kanálech je úměrná kvadrátu rychlosti proudění. Efektivita tohoto procesu se zvyšuje se zvyšující se porositou absorpčního materiálu.

- *Snížením potenciální energie zvukové vlny vnikajícím do materiálu.*

Tím dochází ke snížení akustického tlaku, což může být způsobeno výměnou tepla mezi vzduchem a skeletem pohltivého materiálu při periodických tlakových změnách. Přejednutí tepla, sníží teplotu vzduchu a tím i tlaku v uvažovaném místě. Další způsob relaxace tlaku se projevuje při šíření zvuku pevnými látkami, nebo pevnou kostrou porézní látky. Mění-li se například u nějaké vláknité látky průřez kostry, dochází v místech malého průřezu ke značnějšímu stoupení teploty. Pokud je pak tato látka dobrým tepelným vodičem s vysokým součinitelem přestupu tepla, dochází snadno k vyrovnání teploty s okolím a tím i relaxaci tlaku. Tento způsob přeměny energie nastává zejména při šíření příčného vlnění kovovými deskami, které dobře vedou teplo.

- *Nepružnou deformací vláken pohltivého materiálu.*

U látek vykazující tzv. pružnou hysterezi, dochází k přeměně energie vlivem nepružné deformace tělesa. Stlačíme-li takovou látku, určitou silou, nevrátí se tato látka do původního stavu po skončení působení této síly. Práce vynaložená na deformaci je tedy větší než práce získaná nazpět pružností tělesa návratem do výchozího stavu. Tento rozdíl je právě úbytek zvukové energie vlivem činitele vnitřního tlumení zvuku materiálu.

Většinou se na ztrátě zvukové energie uplatňují, i když v různé míře, všechny uvedené pochody [15].

1.5.4 Snížení hluku

Metody snižování hluku se dělí na primární a sekundární. Mezi primární metody patří především úpravy a snížení budících silových účinků a úpravy zářičů hluku (povrchy strojů). Mezi sekundární metody se řadí hlukové izolace zdrojů hluku od chráněného prostoru (kapotáže, kryty), vhodné prostorové rozmístění hlučných strojů a zařízení tak, aby výsledná hlučnost byla co nejnižší, a také správné projektování prostor se stěnami s vysoce pohltivými materiály – zvukoizolační stěny [4],[5],[6],[7].

Pro tloušťku materiálu použitelného jako vnitřní izolace se vychází z obecného vztahu, který navrhuje tloušťku nutnou pro dobrou pohltivost.

Vztah je následující [4],[5],[6],[7]:

$$h = \frac{1}{10} * \frac{c}{f_m} \quad (30)$$

kde: c – rychlost zvuku [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

f_m – nejnižší frekvence, ke které požadujeme potřebnou pohltivost.

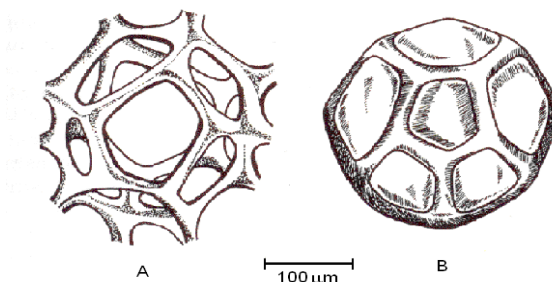
1.5.5 Technická akustika

Technická akustika je užší obor akustiky, který se zabývá měřením akustických veličin v konkrétních technických případech. Vyhodnocuje vybrané akustické veličiny pro konkrétní průmyslové aplikace za použití různých druhů materiálů, struktur, povrchů a jejich kombinací. Zpravidla se jedná o nalezení nejvýhodnějšího řešení pro danou hlukovou problematiku a to tak, aby byly splněny požadavky zadavatele jak z hlediska akustického, ekonomického a ekologického. Smyslem technické akustiky je praktikovat teoretické poznatky zjištěné z různých zdrojů ale také z laboratorních podmínek do praktických požadavků konkrétního zadání. Velmi často se technická akustika (měření akustických veličin, určování zdrojů hluku apod.) aplikuje v průmyslové praxi při navrhování strojních zařízení, u kterých je nutné řešit hlukovou emisi, kterou vyzařuje daný stroj do okolí a mohl by eventuelně ohrožovat lidské zdraví [16].

2 PÓROVITÉ SOUSTAVY

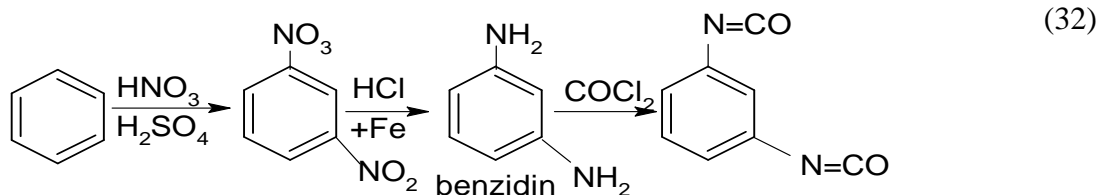
2.1 Pórovité materiály

Tento materiál je typický velkým množstvím pórů. Je charakteristický svou strukturou, která může být buď velmi měkká nebo tuhá. Kostra obsahuje kanálky nebo vzájemně propojené póry, kterými se pohybují vzduchové částice. Existují zde také „slepé“ dutiny, v nichž za ustálených podmínek nedochází k pohybu částic. Pórovité materiály mohou být přírodního charakteru jako třeba korky, dřevo, pemza, anebo syntetického charakteru jako polyuretany, polystyreny a polyamidy. Polymery mohou obsahovat dvě dominantní formy pórů podle chemického složení, a to buď buňky otevřené, nebo uzavřené. Toto má základní vliv na konečné vlastnosti a použití polymeru. Otevřené póry mají vyšší absorpční schopnost pro vodu vlhkost, větší propustnost plynů a par, nižší izolační schopnost tepla, ale vyšší schopnost pohlcovat a tlumit zvuk. Následující (Obr. 3.) ukazuje, jaký je rozdíl mezi póry otevřenými a uzavřenými [8], [9], [10], [11].



Obr. 3. Schematická ukázka otevřených a uzavřených pórů

Následující (Obr. 4.) ukazuje rozdíl mezi koeficientem zvukové pohltivosti pro materiál s uzavřenými póry a materiál s otevřenými póry. Rozdíl mezi těmito dvěma druhy materiálů je značný v průběhu křivky pohltivosti ve frekvenčním pásmu od 16 – 6 400 Hz. Stejný rozdíl jako u křivky s otevřenými a uzavřenými póry je i rozdíl mezi velkým pórem, který má určitý objem a malými póry o určitém počtu „n“, které mají stejný celkový objem jako samostatný pór [4], [5], [6].



Nejdůležitějšími typy jsou [10]:

- diisokyanatotoluen TDI, který se používá prvovýrobu měkkých pěn a zčásti elastomerů.
- diisokyanatodifenylmethan MDI, který slouží pro přípravu elastomerů, polotvrdých a tvrdých integrálních pěn.
- diisokyanatonaftalen – nevysoce reaktivní a používá se pro mechanicky náročné elastomery.

Isokyanáty jsou dráždivé jedy, protože snadno reagují se sloučeninami obsahujícími aktivní vodík, také s tkáněmi lidského těla. Dráždivé účinky se projevují na kůži jako alergie nebo dermatózy, dále mohou pálit nebo slzet oči, dráždit ke kašli, který může předcházet plicním otokům[10].

- *Polyoly*

V praxi používáme hlavně polyesteralkoholy a polyetheralkoholy.

- polyesteralkoholy se vyrábí polyesterifikací dikarboxylových kyselin a přebytkem diolu, produkty mají vyšší tvrdost a jsou odolné vůči povětrnostním vlivům a zvýšené teplotě.
- polyetheralkoholy se připravují polymerací propylenoxidu nebo jeho směsí s ethylenoxidem, slouží pro přípravu nátěrových hmot [10].

- *Extendery*

Ovlivňují povahu a hustotu fyzikálního i chemického zesíťení, hrají důležitou roli v konečných vlastnostech PUR. Reaktivnější jsou aromatické diaminy, které se používají v kombinaci s méně reaktivními předpolymery na bázi TDI. Naproti od hydroxysloučenin, ty jsou méně reaktivní a používají se v kombinaci s reaktivnějšími produkty na bázi MDI [10].

- *Katalyzátory*

Použitím vhodných katalyzátorů můžeme ovlivnit nejen rychlost reakce, ale i poměr rychlostí reakcí vedoucích k prodloužení lineárních řetězců, které uvolňují CO₂ pro tvorbu pěny [10].

Výroba polymeru se liší se podle druhu výrobků [10]:

- *Lehčené hmoty*

- *měkké* – z celkového objemu výroby tvoří asi 50%, téměř 90% z nich se připravuje v blocích, jako hydroxilovou složku můžeme použít lineární nebo slabě rozvětvené polyestery kyseliny adipové a diethylenglykol, nebo polyestery, které dávají stálější výrobek. Připravují se kontinuálně v pracujících zpěňovacích strojích s míchací hlavou, do které se přivádí všechny potřebné látky včetně pomocných. Zde se míchadlem za vysokých otáček vytvoří homogenní kapalina, která se lije do forem, kde bez přívodu tepla napění vzniklým CO₂. Zvětšování objemu probíhá krátce (1-2 minuty), ale výrobek může být z formy vyjmut až po 10 – 20 min. – vzniká „MOLITAN“ [10].
- *tvrdé* – z celkového objemu výroby tvoří 30%, hydroxylová složka je silně rozvětvená. Připravují se v uzavřených nebo v otevřených formách. Mají uzavřené póry, vzhledem k rychlejší výstavbě polymerní sítě. Pracuje se dvoustupňově – napřed se připraví předpolymer, který se může omezeně skladovat. Později se vypěňuje přidáním H₂O (nebo taky fyzikálně přísadkem CClF₃) [10].
- *polotvrde* – připravují se v blocích o hustotě 100 – 150 kg/m³, používají se jako izolační desky (řezané bloky) [10].

- *Integrální* – jako nadouvadlo používáme CClF₃. Mezi teplotou formy a vnitřkem pěny dochází k rozdělení pórů, tzn. čím je nižší teplota formy, tím tlustší je kůra [10].

- *Vlákna a filmy z lineárních PU (termoplasty)*

DIK: hexametylendiizokyanát

Hydroxilová složka: 1,4 butandiol

}
}

1:1 přesně!

\bar{M} = 7.000 – 9.000

Polyadice probíhá buď přímo v bloku (vytlačuje se pásek), nebo v rozpouštědle (polymer vypadne ve formě bílého prášku) [10].

2.2 Vlastnosti pórovitých akustických materiálů

Pod pojmem porézní látka máme v akustice většinou na mysli pevnou látku, v jejímž objemu se nacházejí jemné kapilární póry vyplněné vzduchem. Poměr objemu těchto dutinek k celkovému objemu látky je 60 – 95 %. Materiál, tvořící kostru látky je buď vláknitý, nebo má strukturu ztuhlé pěny. Pohlcování zvuku probíhá mnohem lépe v látkách, jejichž póry jsou navzájem spojeny tak, aby se jimi zvuk mohl šířit látkou dále, respektive, aby mohl vzduch při akustickém kmitání proudit. Jedině tak bude možno využít prvního principu přeměny akustické energie vlivem tření. Póry nemusejí být spojeny u látek, jejichž kostra je velmi poddajná, elastická, takže zvuk do ní snadno z pórů přechází. Příkladem takových látek jsou pěněné měkké umělé hmoty [1].

Většina stavebních materiálů je velmi pórovitých, proto jsou schopny svojí porézní strukturou absorbovat dopadající akustickou energii. Děje se tak díky násobným odrazům akustického paprsku v pórech materiálu, tření vzduchu, který nese akustickou energii, o stěny pórů a přeměně akustické energie na expanzní práci periodicky stlačovaného vzduchu v pórech [1].

Podle struktury se dělí porézní materiály do tří skupin [1], [2]:

- *Vláknité* – dřevovláknité desky, minerální vlna, minerální rohože.
- *Partikulární* – jsou tvořeny anorganickými částicemi kameniva, které jsou lepeny organickými i anorganickými pojivy. Například sem patří akustické desky z mezerovitého betonu a mezerovité polymer betony.
- *Pěnové* – pěnový polyuretan a ostatní pórovité plastické hmoty.

Vláknité materiály jsou v praxi označovány a zahrnovány do skupiny pórovitých materiálů. Je to z toho důvodu, že i tyto materiály, zejména v oblasti akustických aplikací, velmi často obsahují velký objem vzduchu ve svém objemu a i jejich struktura odpovídá definici pórovitého materiálu [1], [2].

Akustické materiály jsou používány obvykle k jednomu ze dvou účelů. Slouží buď k potlačování stojatých vln v uzavřeném prostoru a tím ke zkrácení doby dozvuku, nebo

jako překážky, která snižuje intenzitu zvuku na jeho cestě mezi dvěma místy. Některé materiály mohou sloužit k oběma účelům najednou, ale v praxi se častěji používá zvláštních materiálů k účinnějšímu splnění jednoho z obou úkolů [1], [2].

Pórovité materiály používané ve formě desek zeslabují zvuk jednak tím, že působí jako odrazivé plochy (stejně jako tuhé stěny) a jednak vlivem viskózních ztrát na rozhraních. V obecném případě se účastní kostra i vzduch v pórech přenosu zvukové vlny [1].

Pokud je pohltivý materiál umístěn přímo na nosnou konstrukci (stěnu, strop), dochází ke zpětnému odrazu zvukové vlny. Proto se akustický materiál od konstrukce odsazuje, čímž vznikne vzduchová mezera a dojde ke zvýšení hodnoty činitele zvukové pohltivosti. Vzduchová mezera působí také akusticky pohltivě, a tudíž lze použít porézní materiál menší tloušťky. Ten však musí být od konstrukce umístěn ve vzdálenosti lichých násobků $\frac{\lambda}{4}$ zvukového signálu. Pokud by ale byl umístěn v sudých násobcích, docházelo by naopak k poklesu hodnoty činitele zvukové pohltivosti [1].

Z hlediska fyzikálního můžeme u porézních látek s tuhou kosterou stanovit jejich pohltivé vlastnosti [1].

Při studiu akustických vlastností těchto materiálů se v praxi dává přednost údajům, které byly získány měřením. Na základě měření měrné akustické impedance pohltivého materiálu získáme činitel pohltivosti α pro kolmý dopad akustických vln ze vztahu [1]:

$$\alpha = \frac{1}{0,5 + 0,25 \left(\frac{x}{\rho \cdot c} + \frac{\rho \cdot c}{x} \right)} \quad (33)$$

kde: x – reálná složka měrné akustické impedance [$\text{Ns} \cdot \text{m}^{-3}$], pro kterou platí: $Z = x + jy$

ρ – hustota prostředí [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

c – rychlost šíření akustické vlny [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Maximální hodnota činitele pohltivosti tedy nastává při $x = \rho \cdot c$ a jeho hodnota je $\alpha = 1$. Pokud bychom chtěli určit činitele pohltivosti pro všesměrový dopad, mohli bychom zvolit reprezentativní hodnotu, kterou by poskytoval úhel dopadu 45° . Vlnový odpor prostředí by pak byl vynásoben odmocninou ze dvou a maximální činitel pohltivosti dosáhneme při podmínce $x = \sqrt{2} \cdot \rho \cdot c$ [1].

2.2.1 Porózita, Y [-]

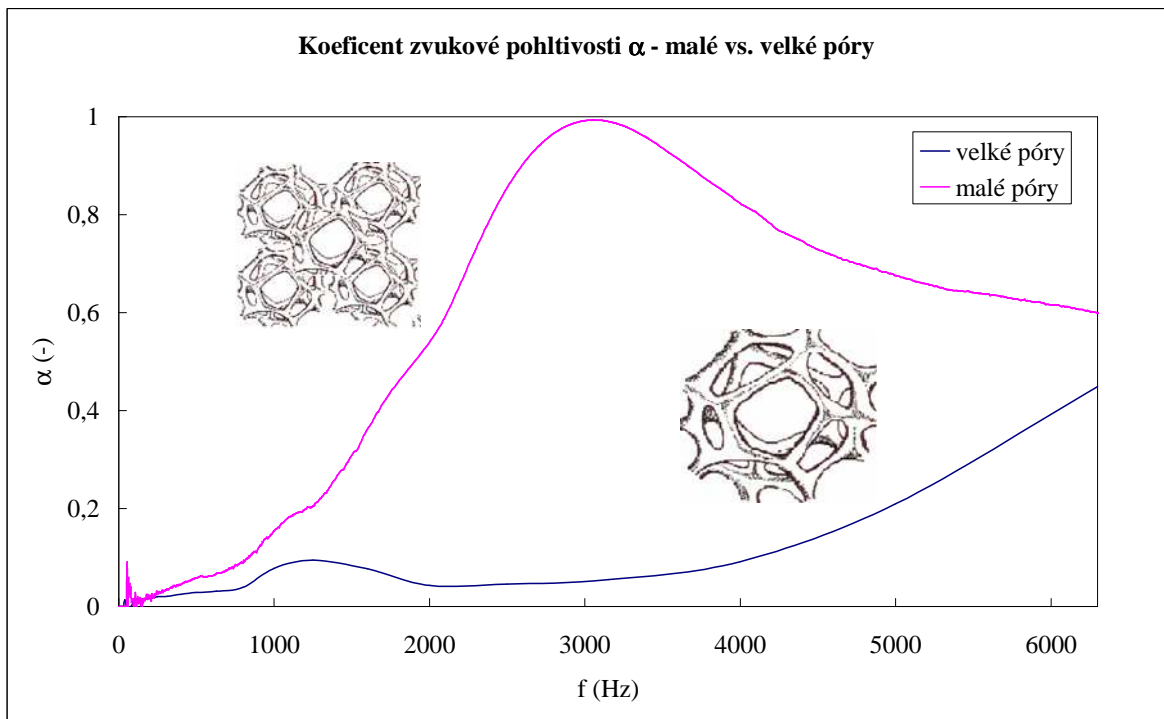
Porózita neboli mezerovost je vlastně poměr objemů pórů V_a k celkovému objemu látky V_m [1].

$$Y = \frac{V_a}{V_m} \quad (34)$$

kde: V_a - objem vzduchu v dutinách [m^3],

V_m - celkový objem zkoušeného materiálu [m^3].

Hodnota porózy je také používána jako hlavní kritérium k určování pórovitosti materiálů. Porózita má zásadní vliv na akustickou pohltivost. Následující (Obr. 5.) ukazuje rozdíl mezi velkým a malým množstvím pórů v objemové jednotce [1].



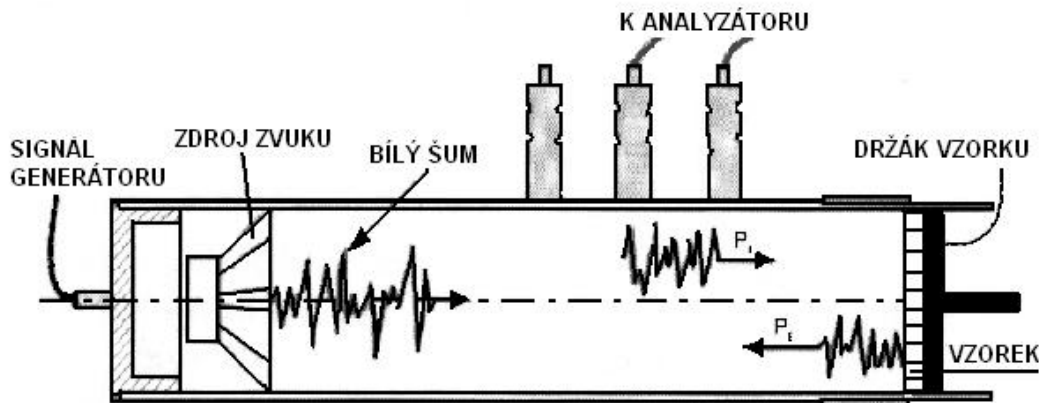
Obr. 5. Pohltivost malých a velkých pórů [17]

2.2.2 Umístění vzorků v Kundtově trubici

Při umístění porézních pohltivých látek nastávají v zásadě dva případy:

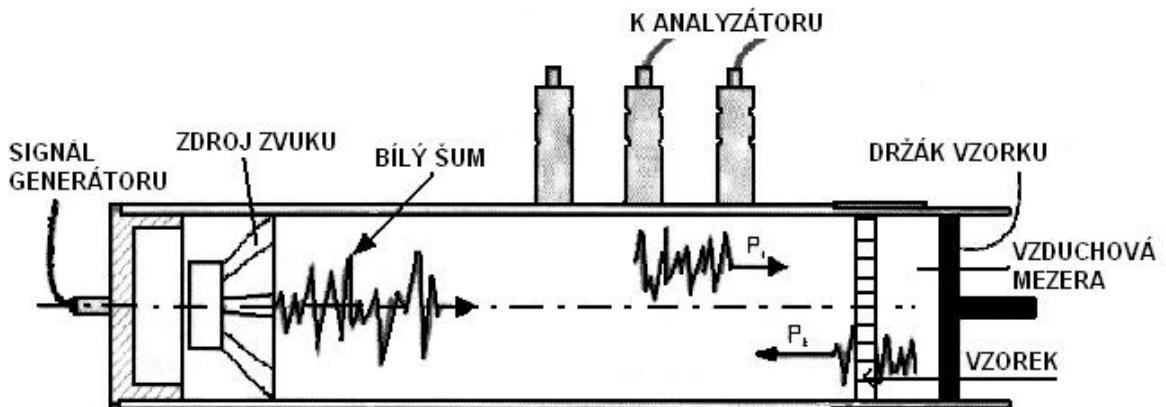
- Zkoumaný vzorek je upevněn na pevné, akusticky tvrdé stěně.
- Mezi zkoušeným vzorkem a stěnou se nachází vzduchová mezera.

V (Obr. 6.) je zaznamenána metodika měření činitele pohltivosti pro porézní látku upevněnou na pevné stěně. Mezi vzorkem a stěnou Kundtova impedanční trubice není žádný vzduch a vzorek je umístěn přímo na držáku vzorku [1].



Obr. 6. Kundtova trubice bez vzduchu, vzorek je umístěn na držáku
[vlastní zpracování]

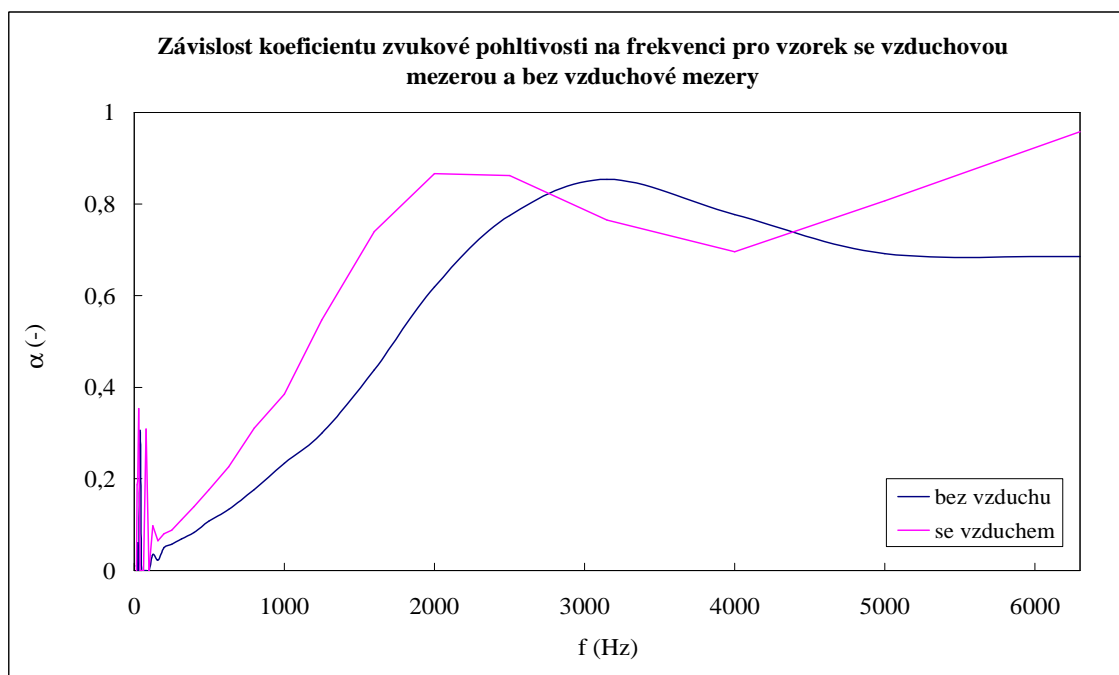
Následující (Obr.7.) ukazuje, jak je vzorek umístěn se vzduchovým polštářem uvnitř impedanční trubice. Akustická pohltivost stoupá se zvyšující se šířkou vzduchové mezery mezi stěnou a vzorkem [1].



Obr. 7. Kundtova trubice se vzduchem [vlastní zpracování]

Z (Obr. 8.) vyčteme, že pohltivost je nízká v oblasti nízkých frekvencí a zvyšuje se směrem k vyšším frekvencím. V závislosti na činiteli poréznosti dosahuje určité maximální hodnoty. Čím vyšší poróznost, tím většího činitele pohltivosti dosáhneme. Při nižších frekvencích rozhoduje o pohltivosti především tloušťka materiálu. Velikost pohybové energie přeměněné v teplo je totiž závislá na amplitudě akustické rychlosti, která je při odrazu na tvrdé stěně rovna nule. Vzniká zde uzel akustické vlny. Se zvyšující se vzdáleností tato amplituda roste a maxima nabývá v místě kmitny, která je od stěny vzdálena o $\frac{1}{4}$ vlnové délky λ . Při nízkých kmitočtech je tedy vlnová délka větší a pohltivý materiál začne zvuk

výrazněji pohlcovat teprve počínaje kmitočtem, jemuž náležící čtvrtina vlnové délky je rovna tloušťce porézní látky. V praxi se proto užívá uspořádání, kdy je pohltivý materiál umístěn v určité vzdálenosti od stěny. Nejlépe je-li střed desky z pohltivého materiálu umístěn od akusticky tvrdé stěny ve vzdálenosti $\frac{1}{4}$ vlnové délky příslušící kmitočtu zvuku, který má být pohlcován [1].



Obr. 8. Ukázka pohltivosti se vzduchovou mezerou a bez vzduchové mezery

II. PRAKTICKÁ ČÁST

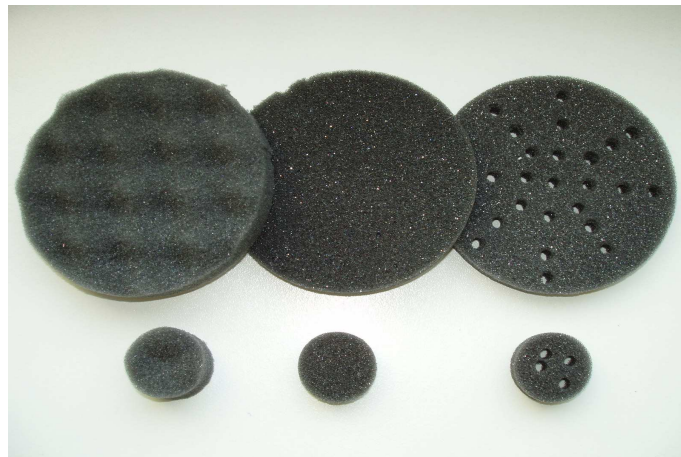
3 POPIS MĚŘENÍ

3.1 Měření akustické veličiny

K základním měřeným akustickým veličinám zmíněných v této kapitole patří koeficient zvukové pohltivosti, koeficient zvukové odrazivosti a akustický útlum. Všechny tyto veličiny byly definovány v předchozích kapitolách.

3.2 Vzorky materiálů použité k měření

Pro praktickou část bylo použito speciálního druhu polyuretanu, který má výrobní označení S3535F a je zobrazen na následujícím obrázku jako vzorek pro měření.



Obr. 9. Vzorek pro měření na Kundtově impedanční trubici - materiál S3535F

Výrobce tohoto materiálu je Gumotex Břeclav a.s. Tento materiál byl zvolen proto, že vykazuje jednak dobré mechanické vlastnosti a také důležitou vlastnost - samozhášivost. Používá se pro: bloky, desky, přířezy, tvarované výrobky, automobilový průmysl, spotřební zboží, zvukovou izolaci. V následující tabulce jsou uvedeny mechanické vlastnosti tohoto druhu polyuretanu [10], [12].

PUR-polyether	Objemová hmotnost netto [kg.m ³] ČSN645411 DIN53420	Odpor při stlačení [kPa] (40%) ČSN645411 DIN53577	Pevnost v tahu [kPa] ČSN645431 DIN53571	Tažnost [%] ČSN 645431 DIN 53571	Trvalá deformace [%] (50%, 23°C, 72h) ČSN 645442 DIN 53572
S3535F	35	3,5	130	190	2

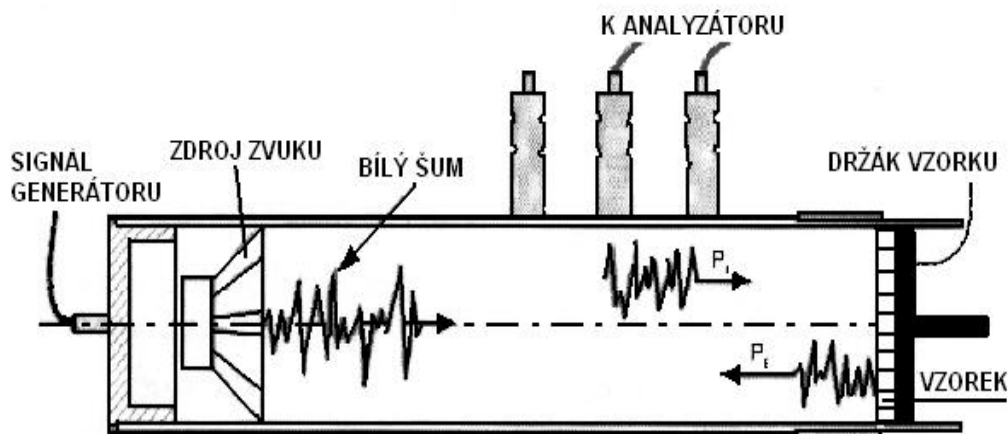
Tab. 2. Mechanické vlastnosti PUR - S3535F [10], [12]

3.3 Použité měřicí zařízení a metody měření

3.3.1 Měření činitele zvukové pohltivosti

K získání hodnot činitele zvukové pohltivosti α měřených vzorků materiálů byla použita dvou-mikrofonová impedanční trubice, která je zkonstruována pro měření ve frekvenční oblasti 16 Hz až 6,4 kHz.

Při této metodě se používá rozkladu akustického signálu generovaného zdrojem uvnitř trubice na dopadající a odraženou složku, tyto složky jsou dány vztahem mezi akustickými tlaky působícími ve dvou místech na stěnu trubice.



Obr. 10. Schematické znázornění dvou-mikrofonové impedanční trubice

[17]

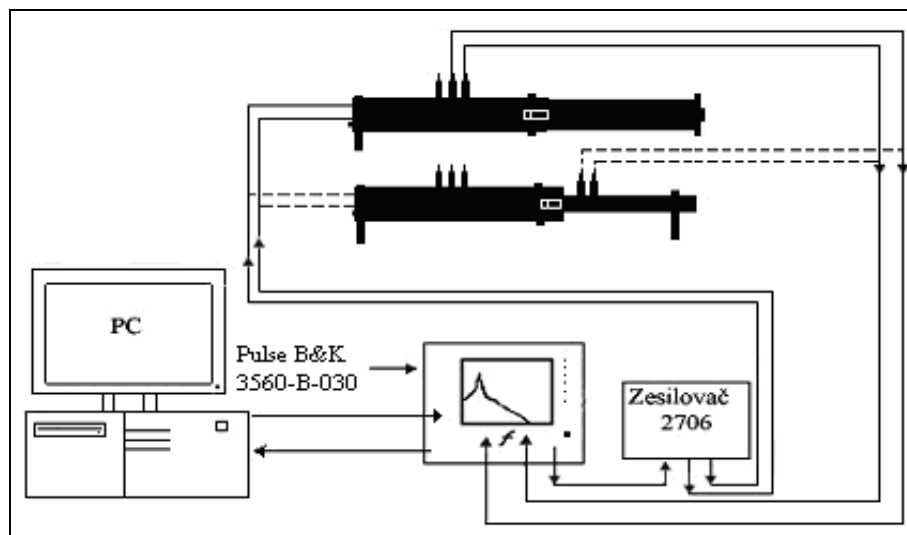
Tato impedanční trubice se sestává z těchto částí:

- velká měřicí trubice, která je určena pro měření ve frekvenční (kmitočtové) oblasti 16 Hz – 1,6 kHz. Tato trubice je vybavena zdrojem zvuku, dále obvodem pro vyvažování frekvencí a obsahuje tři pozice pro montáž mikrofónů
- malá měřicí trubice, jež je zkonstruována pro měření v oblasti frekvencí 64 Hz – 6,4 kHz a která obsahuje dvě pozice určené pro montáž mikrofónů.
- malý a velký držák vzorku, tyto držáky obsahují akusticky tvrdou zadní desku spojenou s pohyblivým pístem.



Obr. 11. Kundtova impedanční trubice a vzorky pro měření koeficientu zvukové pohltivosti [18]

Na dalším (Obr. 12.) je znázorněno zapojení aparatury s velkou a malou měřicí trubicí. Sestava obsahovala dvoukanálový analyzátor PULSE B&K 3560-B-030 a zesilovač B&K 2706. Pro snadnější obsluhu analyzátoru a zpracování dat je k analyzátoru připojen PC s aplikačním programem BZ 5050.



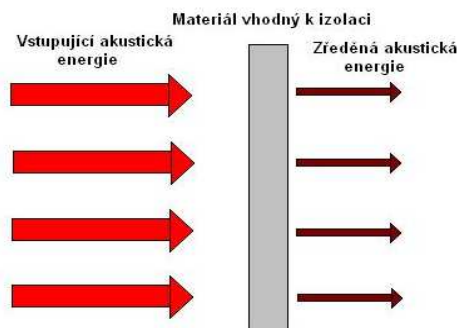
Obr. 12. Zapojení aparatury s velkou a malou měřicí trubicí (sériové zapojení s generátorem signálu B&K 2706 a dvoukanálovým analyzátozem PULSE B&K 3560-B-030) [18]

Na (Obr. 13.) byl použit pro měření akustického útlumu analyzátor typu B&K 2146 a čtvrtpalcový mikrofonu typu B&K 4190.



Obr. 13. Analyzátor typu B&K 2146 pro měření akustického útlumu a čtvrtalcový mikrofon typu B&K 4190 [18]

Pro experimentální využití bylo nutné vytvořit obal (v našem případě papírová krabice z kartonu o tloušťce 0,5 cm) do kterého se aplikovala polyuretanová pěna. Díky této konstrukci pak došlo ke zředění akustické emise od zdroje umístěného uvnitř krabice s izolací, tak jak ukazuje následující obrázek (Obr. 14.)



Obr. 14. Zředění akustické energie vlivem překážky [vlastní zpracování]

3.3.2 Prostředí PULSE

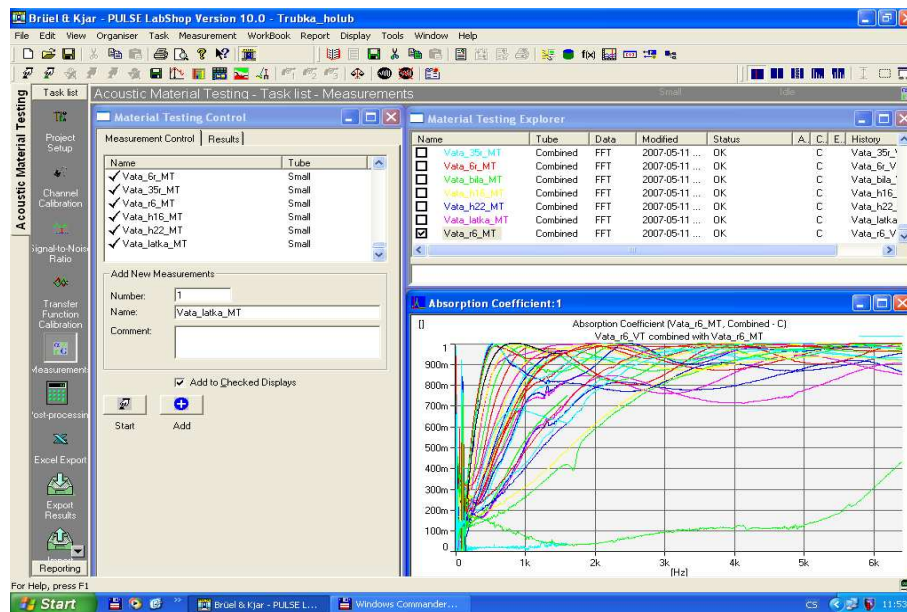
Pro měření koeficientu zvukové pohltivosti a odrazivosti byl použit analyzátor firmy B&K PULSE typ 3560-B-030 a softwarové rozhraní spojené s analyzáto-rem.



Obr. 15. PULSE typ 3560-B-030 [18]

Přenosný přístroj umožňující zpracování a analýzu signálů v reálném čase ve frekvenčním rozsahu od 0 Hz do 25 kHz. V kombinaci s dvou-mikrofonovou trubicí Brüel & Kjaer 4206 se používá k měření absorpčních a odrazových charakteristik materiálů. Používá se taky jako analyzátor hladiny zvuku.

Pro vlastní měření a vyhodnocení dat z analyzátoru PULSE slouží program LabShop, který je poskytován pro jednotlivé aplikace analyzátoru pomocí připojeného počítače. Prostředí programu ukazuje následující (Obr. 16.) pro měření koeficientu zvukové pohltivosti a odrazivosti, ve kterém se měří jednotlivé metody impedanční trubice (malá trubice a velká trubice), kombinují se výsledná data a exportují do xls formátu (MS Office - Excel).



Obr. 16. Prostředí LabShop[18]

3.3.3 Výpočty

Pro měření koeficientu zvukové pohltivosti perforovaných vzorků jsem musela zjistit celkový úbytek plochy a hmotnosti vzhledem k celistvým vzorkům, na které dopadala akustická energie. Následující výpočty ukazují jejich rozdíl.

- Vypočítané plochy vzorků:

S_1 ...průměr 10 cm.....1x (celistvá plocha podstavy před perforací)

$$S_1 = \pi * r^2$$

$$S_1 = \pi * 5^2$$

$$S_1 = \underline{\underline{78,54 \text{ cm}^2}}$$

S_2 ...průměr 0,5 cm.....25x (plocha pro jednu díru z počtu 25 děr)

$$S_2 = \pi * r^2$$

$$S_2 = \pi * 0,25^2$$

$$S_2 = \underline{\underline{0,196 \text{ cm}^2}}$$

S_3 ...výpočet celkové plochy (konečná plocha po perforaci)

$$S_3 = S_1 - (25 * S_2)$$

$$S_3 = 78,54 - (25 * 0,196)$$

$$S_3 = \underline{\underline{73,64 \text{ cm}^2}}$$

- Vypočítané hmotnosti vzorků:

V_1 ...průměr 10 cm, tloušťka 1 cm.....1x (celistvá plocha před perforací)

$$V_1 = \pi * r^2 * v$$

$$V_1 = \pi * 5^2 * 1$$

$$V_1 = \underline{\underline{78,54 \text{ cm}^3}}$$

V_2 ...průměr 0,5 cm, tloušťka 1 cm.....25x (plocha pro jednu díru z počtu 25 děr)

$$V_2 = \pi * r^2 * v$$

$$V_2 = \pi * 0,25^2 * 1$$

$$V_2 = \underline{\underline{0,196 \text{ cm}^3}}$$

V₃ ... výpočet celkového objemu (konečná plocha po perforaci)

$$V_3 = V_1 - (25 * V_2)$$

$$V_3 = 78,54 - (25 * 0,196)$$

$$\underline{\underline{V_3 = 73,64 \text{ cm}^3}}$$

m ... výpočet celkové hmotnosti ($\rho = 35 \text{ kg/m}^3$)

$$m = \rho * V_3$$

$$m = 35 * 10^{-3} * 73,64$$

$$\underline{\underline{m = 2,5774 \text{ g}}}$$

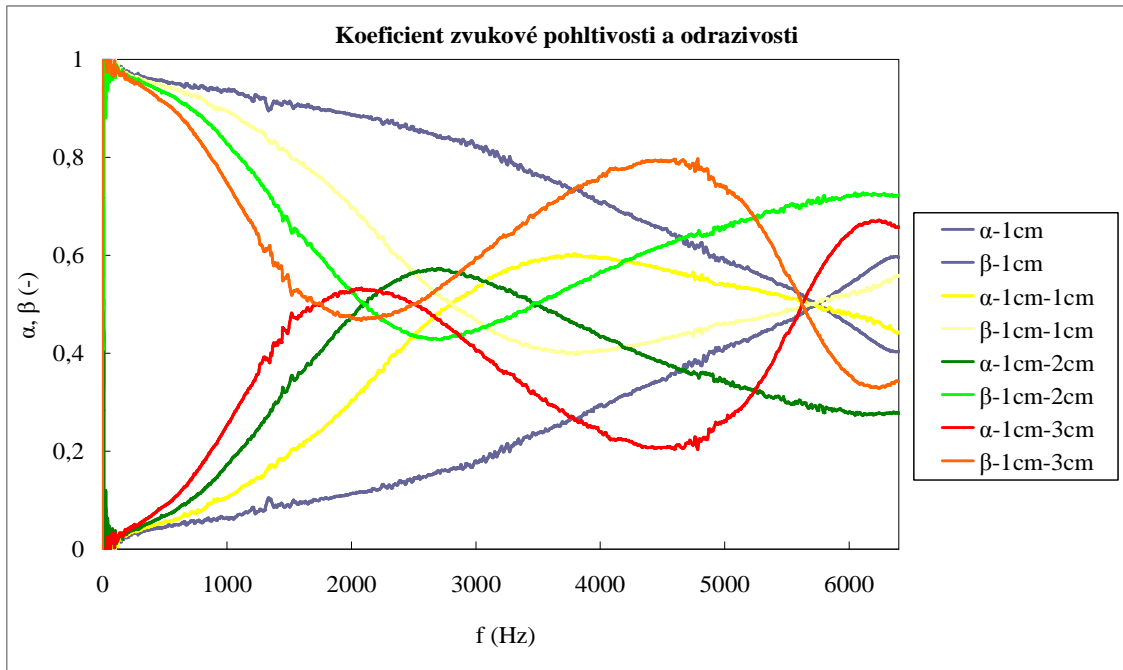
3.3.4 Značení vzorků

V grafech, které ukazují jednotlivé křivky koeficientu akustické pohltivosti a odrazivosti jsou uvedeny následující termíny a jejich vysvětlení:

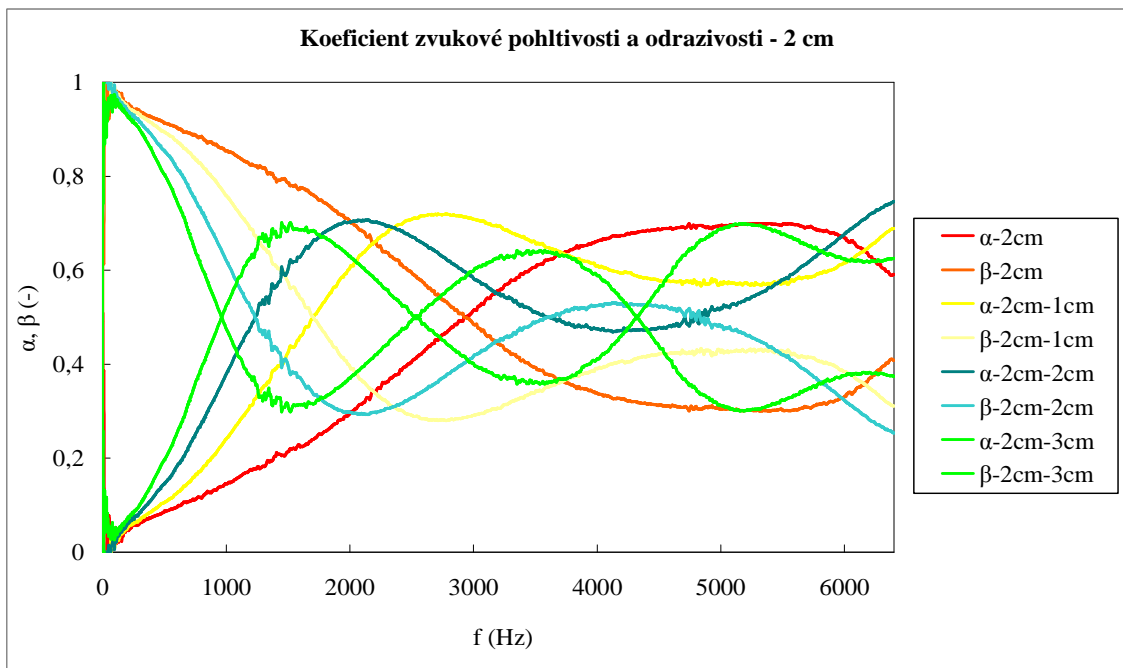
- α , β – koeficient zvukové pohltivosti, odrazivosti
- 1 cm, 2 cm a 3 cm – značí tloušťku materiálu nebo vzduchové mezery
- Vlna – vlnitý povrch materiálu
- Celý – celistvý povrch materiálu
- Díra – perforovaný povrch materiálu skrz celou tloušťku vzorku

Značení v legendě grafu popisuje vzorek např. takto: „ α – 1cm – 2cm – celý“, kde na první symbol označuje koeficient pohltivosti nebo odrazivosti, druhé místo tzn. rozměr 1 cm označuje tloušťku materiálu, třetí místo tzn. 2 cm je rozměr vzduchové mezery a poslední značení tzv. celý označuje, že se jedná o celistvou strukturu materiálu.

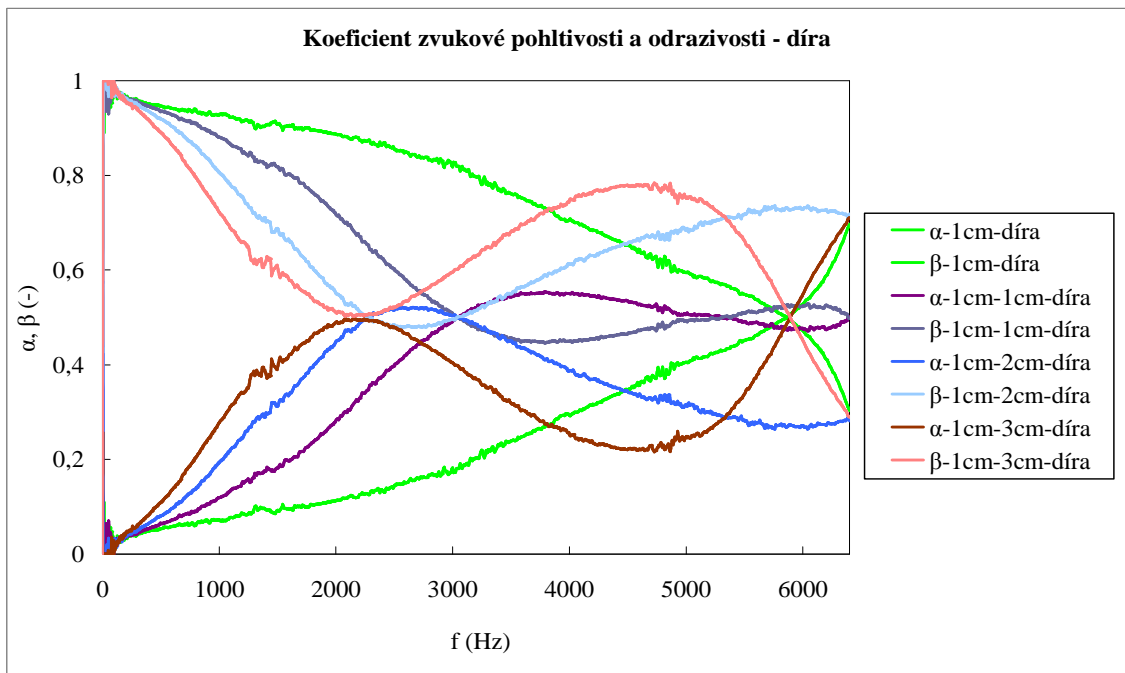
3.4 Naměřené hodnoty akustické pohltivosti a odrazivosti



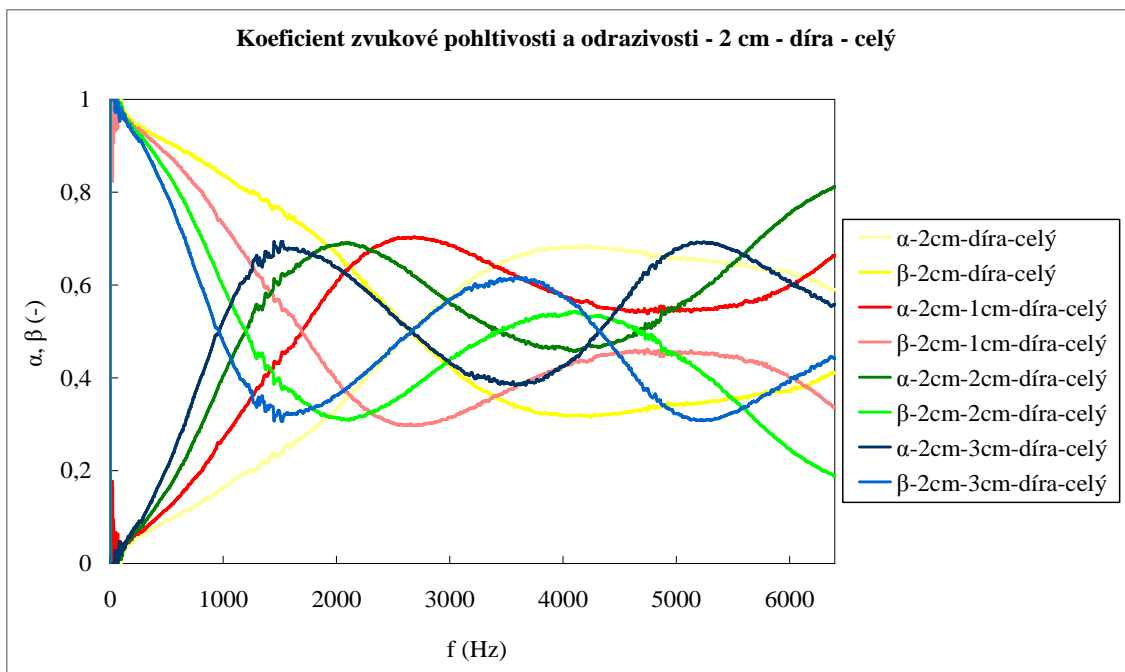
Obr. 17. Zobrazení koeficientu zvukové pohltivosti a odrazivosti pro 1 cm celistvého vzorku se vzduchovou mezerou 1cm, 2 cm a 3 cm



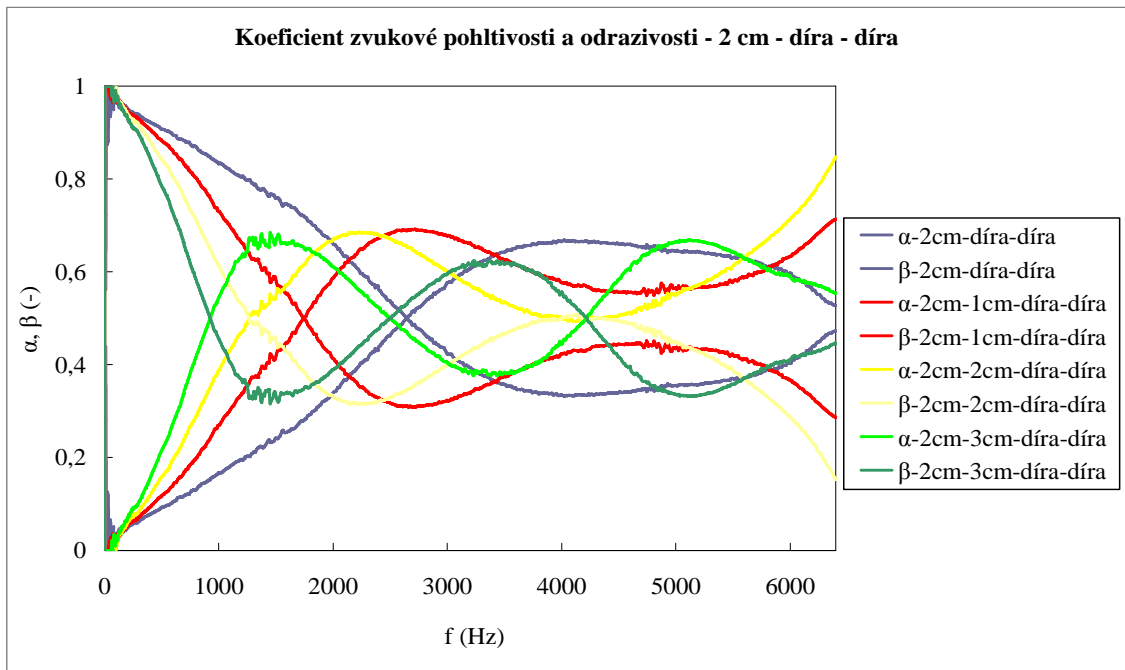
Obr. 18. Zobrazení koeficientu zvukové pohltivosti a odrazivosti pro 2 cm celistvého vzorku se vzduchovou mezerou 1cm, 2 cm a 3 cm



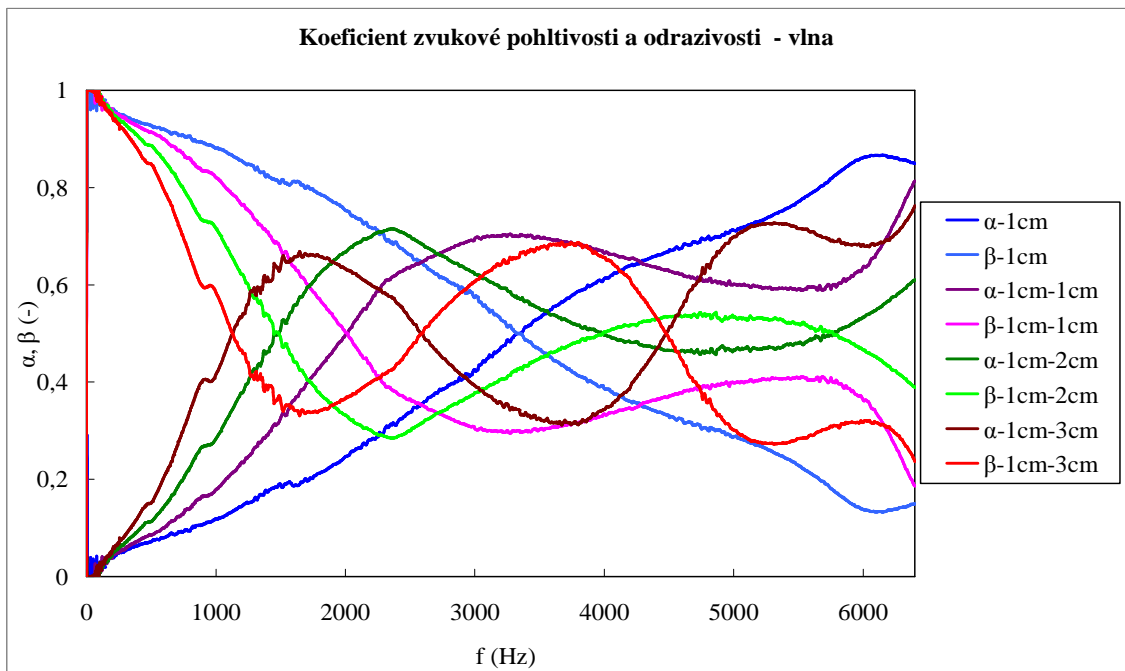
Obr. 19. Zobrazení koeficientu zvukové pohltivosti a odrazivosti pro 1 cm perforovaného vzorku s 1 cm, 2 cm a 3 cm vzduchovou mezerou



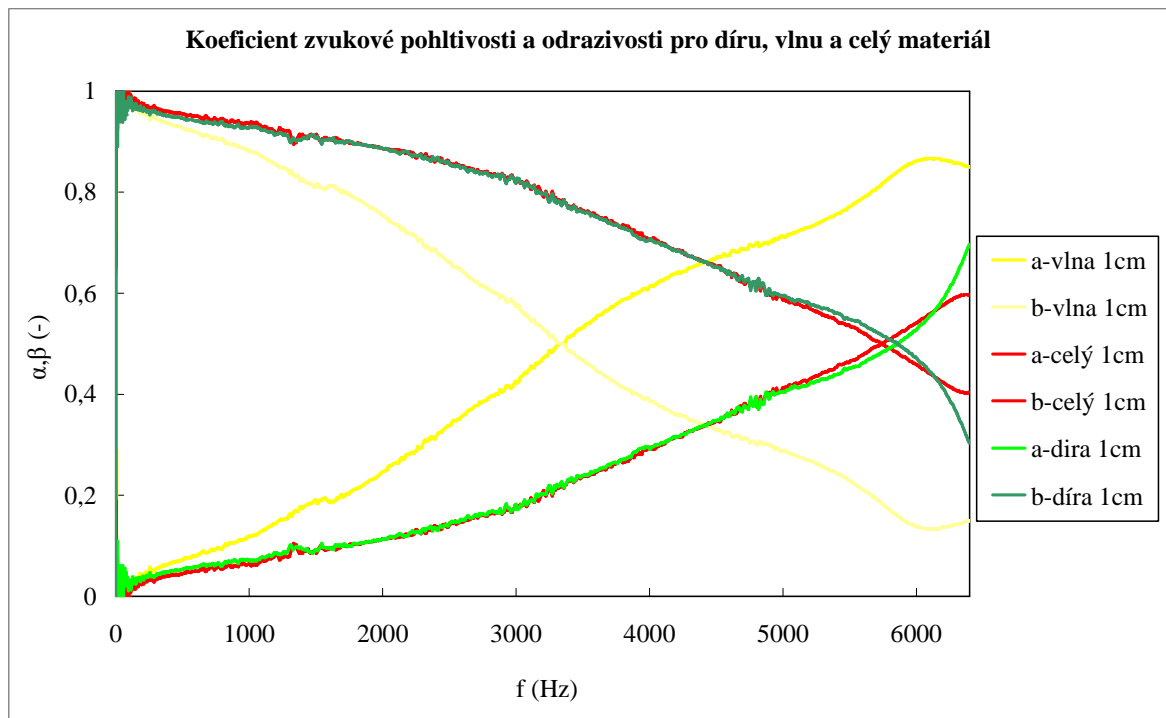
Obr. 20. Zobrazení koeficientu zvukové pohltivosti a odrazivosti pro 2 cm perforovaného vzorku, který byl z 1 cm perforován a ve 2 cm byl celý s 1 cm, 2 cm a 3 cm vzduchovou mezerou



Obr. 21. Zobrazení koeficientu zvukové pohltivosti a odrazivosti pro 2 cm vzorku, který byl perforován skrz celý s 1cm, 2 cm a 3 cm vzduchovou mezerou

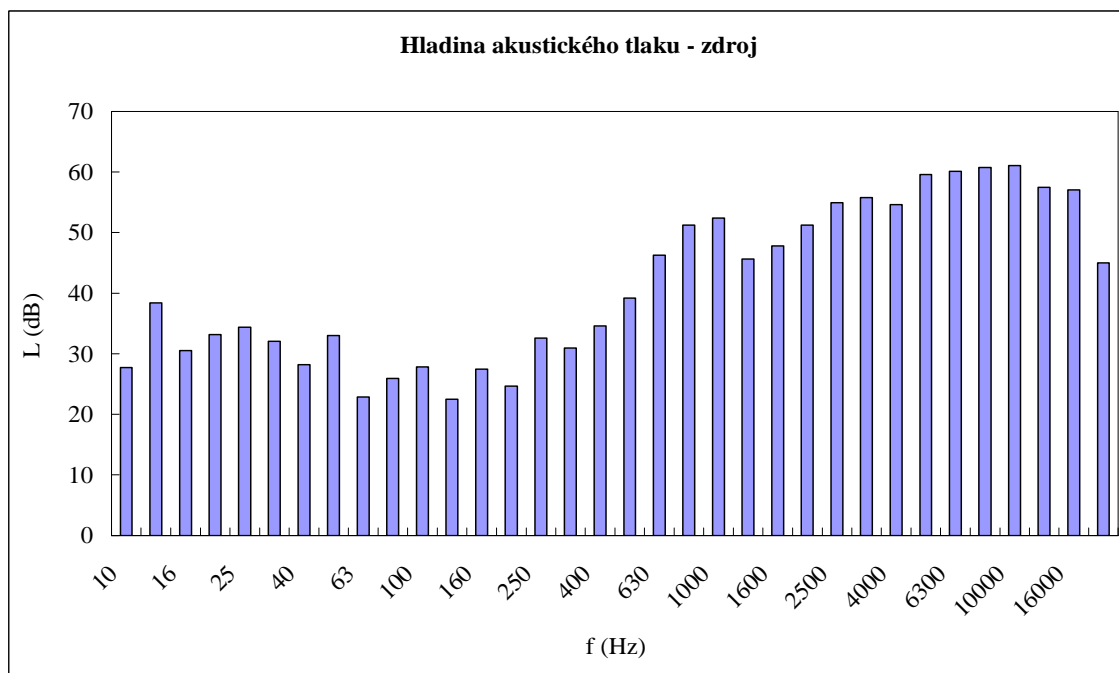


Obr. 22. Zobrazení koeficientu zvukové pohltivosti a odrazivosti pro 1 cm vlnitého vzorku s 1cm, 2 cm a 3 cm vzduchovou mezerou

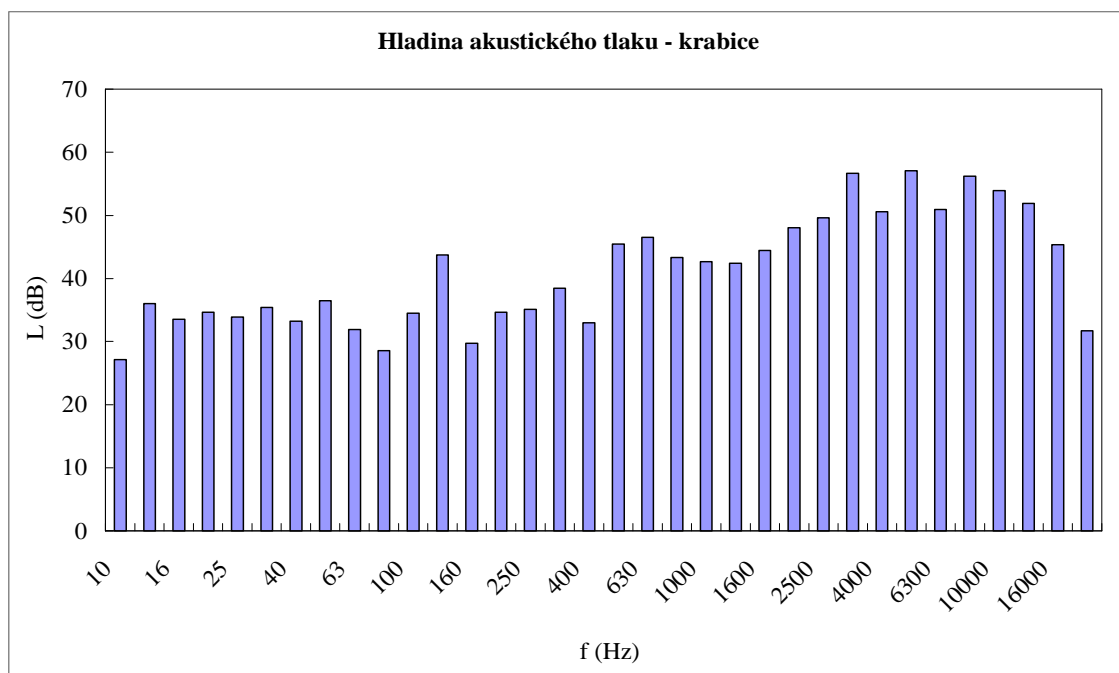


Obr. 23. Zobrazení koeficientu zvukové pohltivosti a odrazivosti pro děrovaný, vlnitý a celistvý materiál

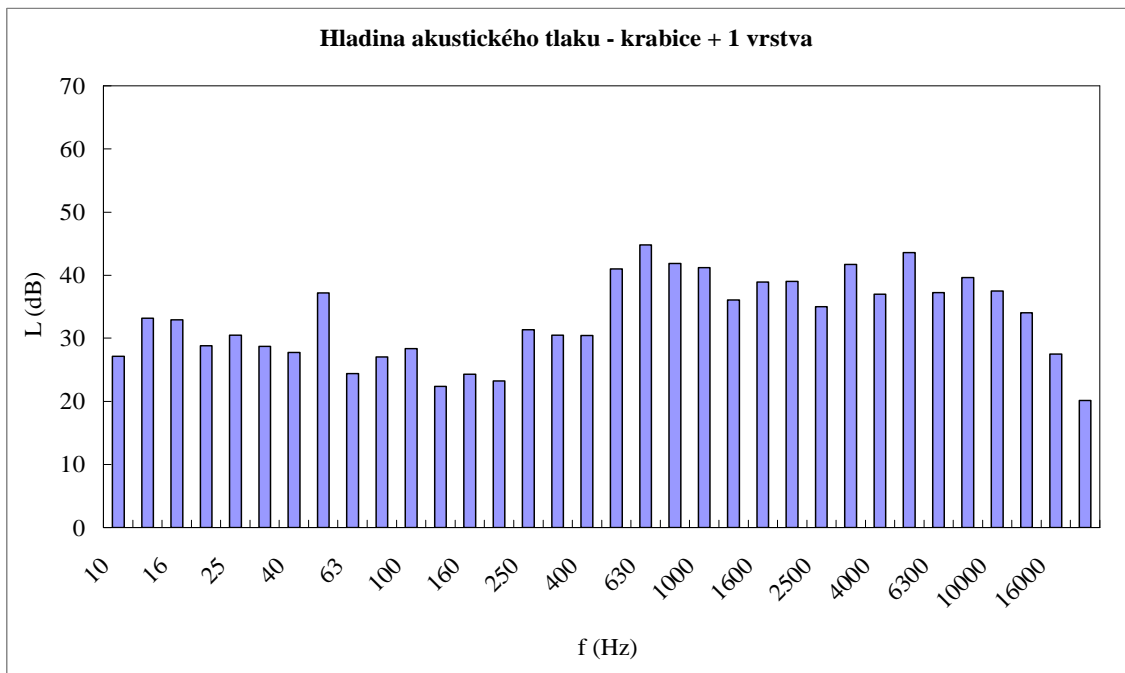
3.5 Naměřené hodnoty hladin akustického tlaku



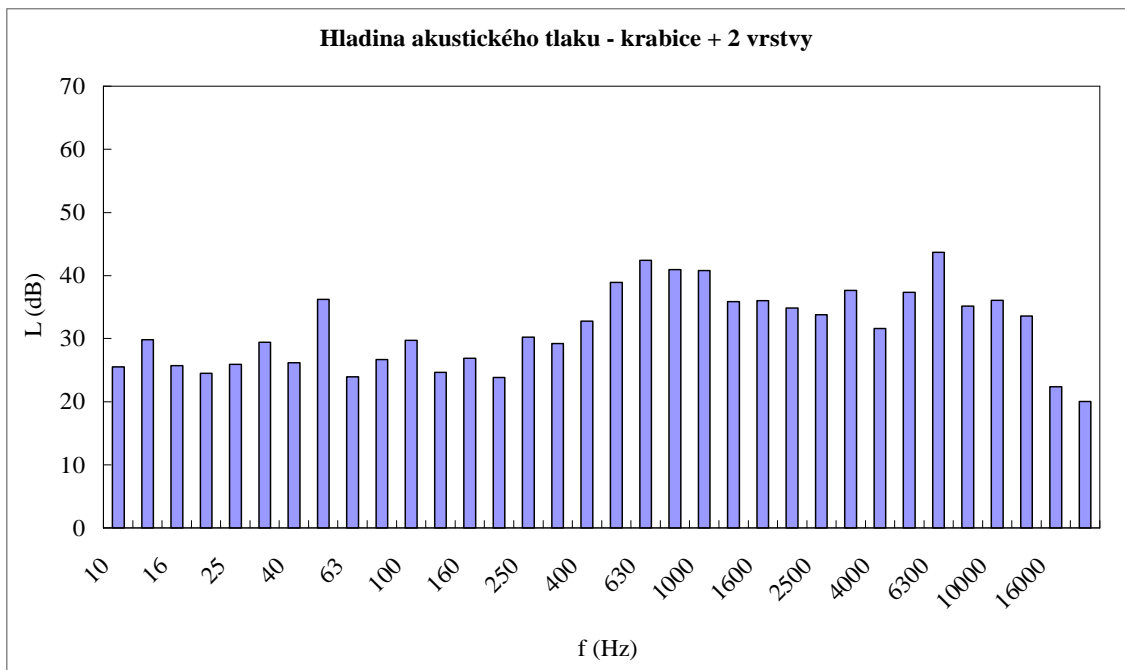
Obr. 24. Zobrazení hladiny akustického tlaku pro zdroj - vrtačku



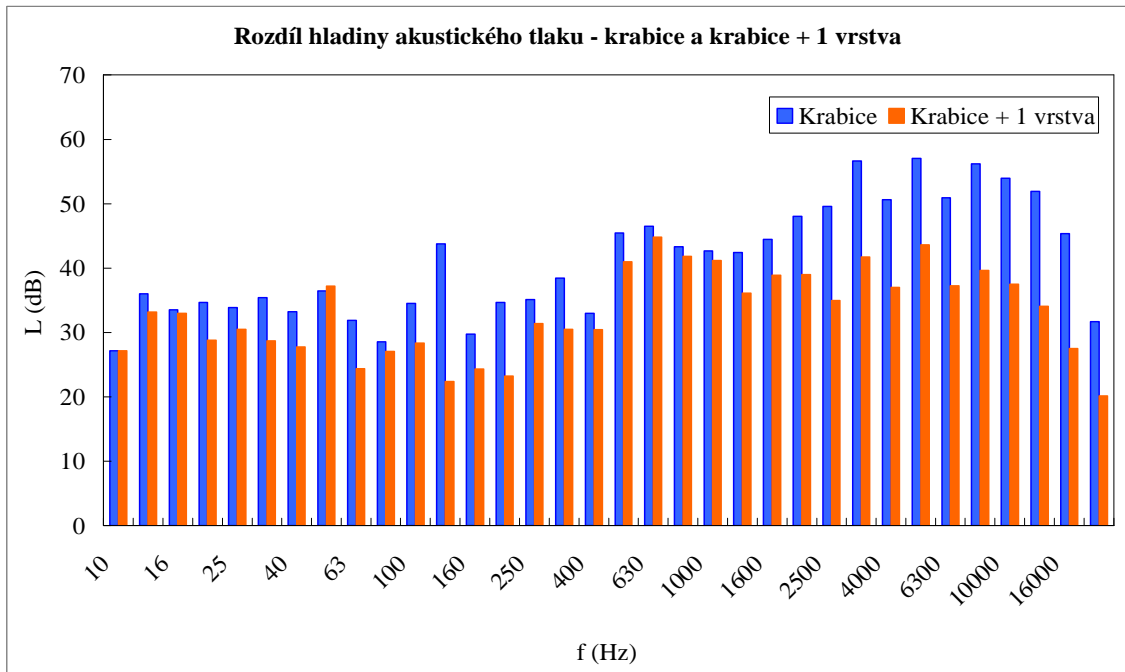
Obr. 25. Zobrazení hladiny akustického tlaku pro zdroj, který byl v krabici



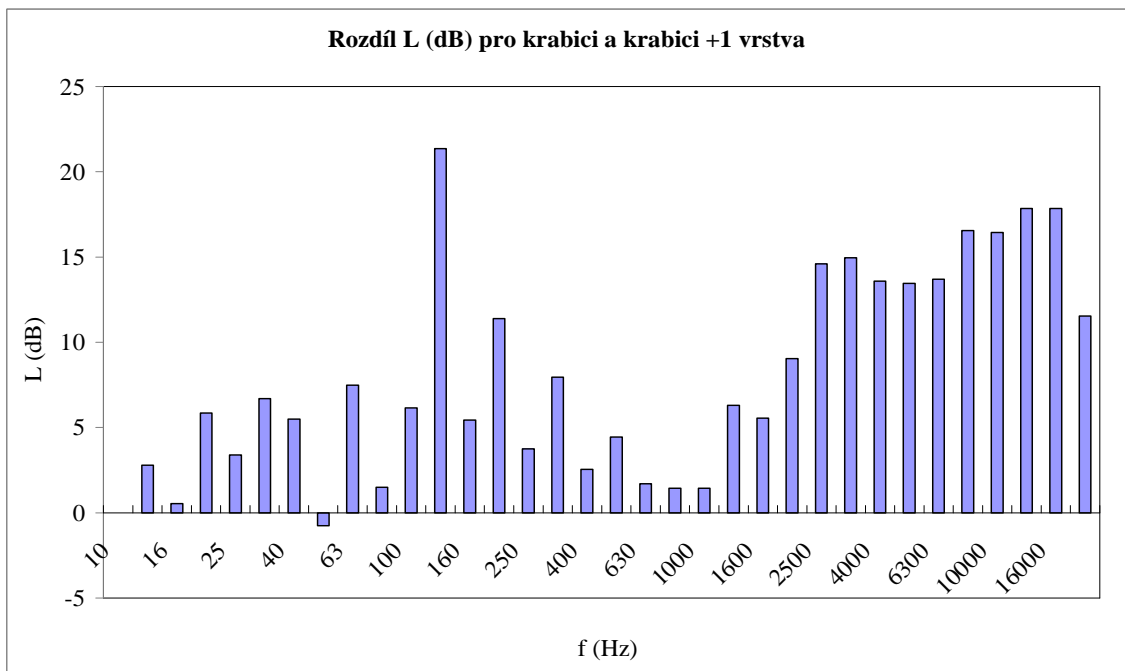
Obr. 26. Zobrazení hladiny akustického tlaku pro krabici, která byla vystlána 1 vrstvou



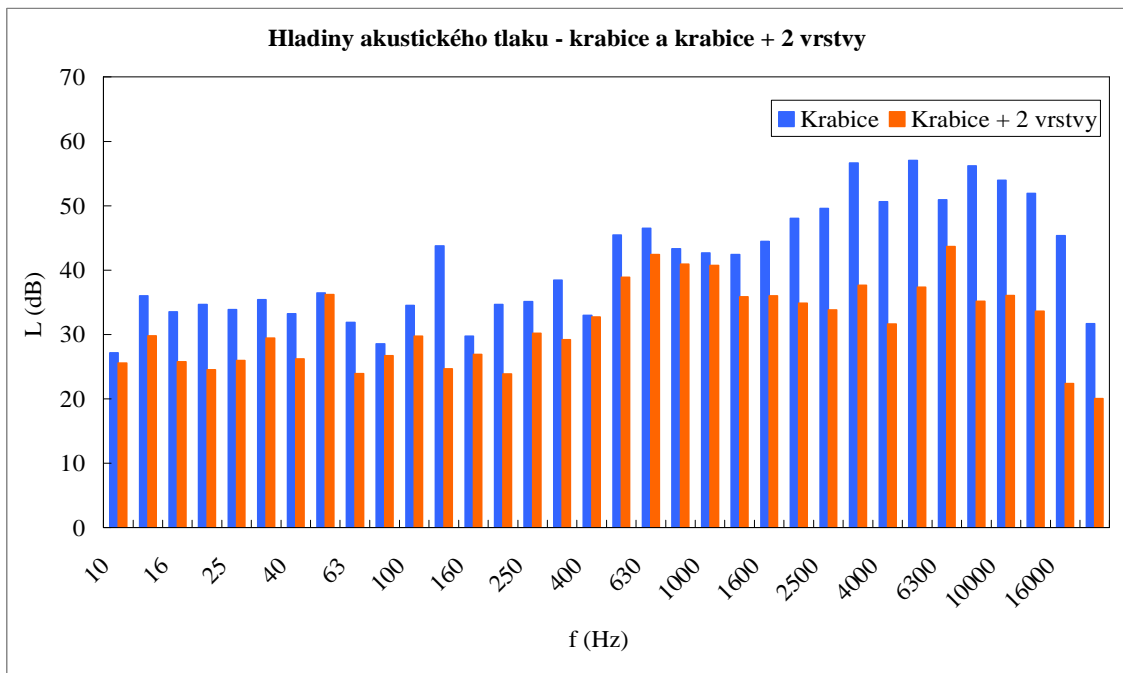
Obr. 27. Zobrazení hladiny akustického tlaku pro krabici, která byla vystlána 2 vrstvami PUR



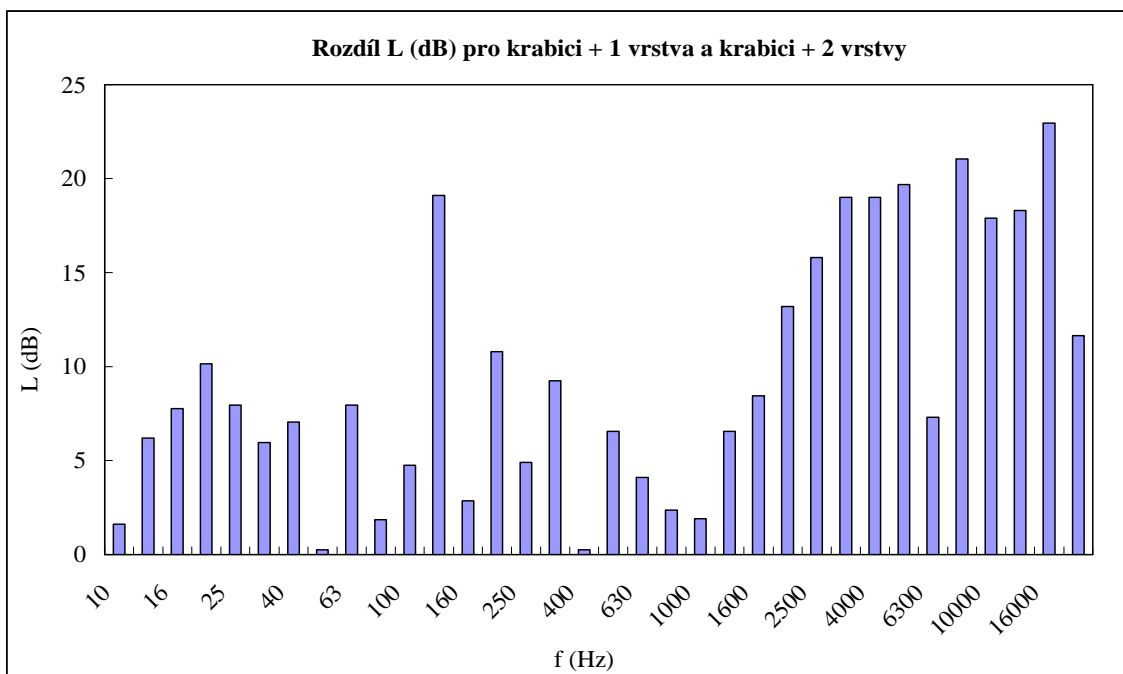
Obr. 28. Zobrazení hladin akustického tlaku pro krabici a krabici s 1 vrstvou PUR



Obr. 29. Rozdíl hladin akustických tlaků krabice a krabice s 1 vrstvou PUR



Obr. 30. Zobrazení hladiny akustického tlaku pro krabici a krabici se 2 vrstvami PUR



Obr. 31. Rozdíl hladin akustických tlaků pro krabici s 1 vrstvou a krabici se 2 vrstvami PUR

ZÁVĚR

Shrneme-li předešlé výsledky tohoto měření, můžeme konstatovat, že pórovité materiály na polyuretanové bázi pohlcují jako jedny z nejlepších zvukovou energii. Pohltivost jako taková je závislá jednak od tloušťky vzorku a jeho porózy, povrchu jakým byl materiál upraven ale také na vzduchové mezeře mezi koncovou stěnou měřící aparatury a vzorkem. Z toho vyplývají závislosti, že křivky akustické pohltivosti mají stoupající charakter zejména v oblasti od 500 do 2 000 Hz a po tomto frekvenčním rozsahu je již koeficient pohltivosti ustálený na hodnotách α . Mezi 500 Hz a 2 000 Hz je tzv. přechodové pásmo, které je posunuto více či méně k 500 Hz nebo 2 000 Hz, a to v závislosti na tloušťce měřeného materiálu, povrchu a vzduchové mezery. Co se týče odrazivosti nelze polyuretany označit jako materiály vhodné pro akustickou odrazivost. Pro efektivní odrazivost (β koeficient), což v praxi znamená, že veškerá dopadající energie je odražena (nebo alespoň její největší množství) je třeba co nejvíce hladkých, tvrdých a celistvých povrchů, čemuž ale porézní struktura polyuretanu nevyhovuje.

Jak již bylo zmíněno, u všech druhů pórovitých materiálů – polyuretanů je koeficient zvukové pohltivosti závislý na tloušťce. První maximum koeficientu pohltivosti ve frekvenčním rozsahu 500 Hz – 2 500 Hz je pro vzorek s vlnitým povrchem a také pro vzorky, u kterých byla vytvořena vzduchová mezera. Můžeme tedy konstatovat, že tyto materiály lze využít pro akustické izolace v příslušných frekvencích (ideálně opět mezi 500 – 2 000 Hz), ve kterých vykazují maximální koeficient zvukové pohltivosti. Maximálních hodnot $\alpha = 0,7$ vykazoval vzorek s vlnitým povrchem a také celistvý vzorek za přítomnosti vzduchové mezery kolem hodnoty 2 000 Hz.

Pro koeficient zvukové pohltivosti bylo také významné zjištění, že vzorky s celistvým a perforovaným povrchem mají téměř totožnou křivku závislosti pohltivosti na frekvenci (Obr. 23.). Nepatrné změny jsou zřejmé až ve vysokých frekvencích (6 000 Hz), které se v praxi vyskytují jen výjimečně. Toto je zejména výhodné, pokud je žádoucí úspora materiálu a to z hlediska plošného a hmotnostního.

Další závěr, který můžeme vyslovit je, že nejvyšších hodnot koeficientu zvukové pohltivosti α přes celé frekvenční spektrum obecně dosahují vzorky největší šířky a nejnižší hodnoty náleží vzorkům nejtenčím.

Poslední měření bylo provedeno pro zjištění hladiny akustického tlaku pro 1/3 oktávové pásmo. Byl použit materiál S3535F, který vykazoval velmi dobrých výsledku v akustické pohltivosti. Bylo použito dvou tloušťek izolace – jedna a dvě vrstvy izolace zdroje. Jejich závislosti jsou uvedeny na (Obr. 29. a Obr. 31.). Ze závislostí vyplývá, že nejvyšších akustických útlumů polyuretan vykazuje ve frekvenční oblasti nad 1 600 Hz. Reálný praktický rozsah je v oblasti 63 Hz – 8 000 Hz, který je zobrazen v grafech pro měření akustického tlaku. Z grafů pak lze použít hodnoty akustického útlumu, který je zobrazen v grafech pro rozdíl hladin akustického tlaku a lze pak aplikovat akustickou izolaci v potřebných frekvenčních oblastech, tak jak byl proveden experiment. V nízkofrekvenční oblasti je útlum již méně významný, ale v praxi se vyskytuje více než vysokofrekvenční pásmo.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] NOVÝ, R. *Hluk a chvění*, Praha: ČVUT, 2000, ISBN 80-01-02246-3
- [2] MIŠUN, V. *Vibrace a hluk*, Brno: PC-DIR Real, spol. s.r.o.,1998. ISBN 80-214-1262-3
- [3] WIKIPEDIA.ORG - vnímání zvuku [online]. [cit. 2008-25-02], dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Zvuk>>
- [4] BRŮHA, O. *Aerodmechanika, výkony letadel – letecký průvodce 3*. Praha: SNTL, 1957. DT 629.135 533.6 Bez ISBN
- [5] MADEJEWSKI, B. *Aeroakustika, základy teorie a aplikace na konstrukci letadel*. Brno: VUT Brno, 1986. ISBN 55-587/1-86
- [6] ŠULC, J. *Konstrukce a pevnost letadel, Technická akustika II. A III. část (obrazová část)*, VA ZA – jen pro potřeby posluchačů, VA ZA 1973, skripta. Bez ISBN
- [7] SWIFT, M. J., BRIŠ, P., HOROSHENKOV, K.V. *Applied Acoustics 57*. 203, 1999
- [8] MEISSNER, B. *Fyzikální vlastnosti polymerů – část I*. Praha: VŠCH Praha, 1971. ISBN 440-33985
- [9] JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*, Brno: VUT Brno, Fakulta chemická, 2003. ISBN 80-214-2443-5
- [10] MLEZIVA, J., ŠŇUPÁREK, J. *Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2 přepracované vydání, Praha, Sobotáles 2002, ISBN 80-85920-72-7
- [11] KLEMPNER, D., FRISCH, C. *Handbook of polymeric foams and foam technology*. Hanser Publishers, Munich Vienna New York Barcelona, 1991. ISBN 3-446-15097-8
- [12] GUMOTEX.CZ – přehled vyrobených pěn [online] [cit. 2008-19-03], dostupné z: <<http://www.gumotex.cz/vyroby/penove-hmoty/prehled-pen/>>
- [13] ČECHURA J., *Stavební fyzika 10: akustika stavebních konstrukcí*, Praha, 1.vydání, ČVUT Praha 1997, ISBN 80-01-01593-9

- [14] ŠŤASTNÍK S., ZACH J., *Stavební akustika a zvukoizolační materiály*, Brno, akademické nakladatelství CERM, 2002, ISBN 80-214-2117-7
- [15] LAPČÍK L., RAAB M. *Nauka o materiálech II*, Zlín, UTB Zlín, 2004, ISBN 80-7318-229-7
- [16] Technická akustika na technickém zkušebním ústavu v Piešťanech, [online]. [cit. 2008-25-04], dostupné z: <http://www.tsu.sk/index.php?page=14&page_sub=35>
- [17] JUŘIČKA M., *Materiály pro tlumení hluku a vibrací v leteckém průmyslu na bázi polyuretanů*, Disertační práce, UTB Zlín, Zlín 2008
- [18] Přístrojové a softwarové vybavení pro akustické měření na Ústavu fyziky a materiálového inženýrství, Fakulty technologické, Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, [online]. [cit. 2008-14-04], dostupné z: <<http://www.ft.utb.cz/czech/ufmi/vybaveni.html>>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

α	-	koeficient zvukové pohltivosti
β	-	činitel zvukové odrazivosti
c	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	rychlost šíření akustické vlny
c_0	m/s	rychlost zvuku
c_B	m/s	ohybové vlnění
c_L	m/s	podélné vlnění
c_T	m/s	příčné vlnění
h	m	tloušťka materiálu
E	Pa	modul pružnosti v tahu
ε	-	činitel přeměny
f	Hz	frekvence
f_m	Hz	nejnižší frekvence
G	Pa	modul pružnosti ve smyku
I	W/m^2	intenzita zvuku
I_0	W/m^2	referenční intenzita zvuku
K	Pa	modul objemové pružnosti (stlačitelnosti)
k	-	koeficient změny rychlosti
L_N	Ph	hladina hlasitosti
m_a	-	činitel útlumu zvuku ve vzduchu
λ	m	vlnová délka
μ	-	Poissonova konstanta
π	-	Ludolfovo číslo – konstanta
P	W	akustický výkon ve watech
p_{ef}	Pa	efektivní hodnota akustického tlaku

p	Pa	efektivní hodnota akustického tlaku
p_0	Pa	referenční hodnota akustického tlaku
p_c	Pa	celkový tlak
p_b	Pa	barometrický tlak
p_{00}	Pa	amplituda kolísavého tlaku
\tilde{p}_0	-	komplexní amplitudy
ρ	kg/m^3	hustota prostředí
S	m^2	plocha vzorku
t	$^{\circ}\text{C}$	teplota
T	s	perioda vlnění
τ	-	činitel zvukové průzvučnosti
φ	-	fázový posun
$\varphi_{1,2}$	-	úhel dopadu lomu
V	m^3	objem
V_a	m^3	objem vzduchu v dutinách
v	m/s	akustická rychlost
v_{ef}	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	efektivní hodnota akustického tlaku
\tilde{v}_0	-	komplexní amplituda
x	$\text{Ns}\cdot\text{m}^{-3}$	reálná složka měřené akustické impedance
Y	-	porózita
Z	Ns/m^3	měrná akustická impedance prostředí

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Kolísání akustického tlaku okolo barometrického</i>	15
<i>Obr. 2. Akustická vlna na rozhraní plynné a pevné fáze (rozhraní vzduch x pevná látka).....</i>	22
<i>Obr. 3. Schematická ukázka otevřených a uzavřených pórů.....</i>	27
<i>Obr. 4. Pohltivost otevřených a uzavřených pórů [17]</i>	28
<i>Obr. 5. Pohltivost malých a velkých pórů [17]</i>	33
<i>Obr. 6. Kundtova trubice bez vzduchu, vzorek je umístěn na držáku</i>	34
<i>Obr. 7. Kundtova trubice se vzduchem [vlastní zpracování]</i>	34
<i>Obr. 8. Ukázka pohltivosti se vzduchovou mezerou a bez vzduchové mezery</i>	35
<i>Obr. 9. Vzorek pro měření na Kundtově impedanční trubici - materiál S3535F</i>	37
<i>Obr. 10. Schematické znázornění dvou-mikrofonové impedanční trubice [17]</i>	38
<i>Obr. 11. Kundtova impedanční trubice a vzorky pro měření koeficientu zvukové pohltivosti [18].....</i>	39
<i>Obr. 12. Zapojení aparatury s velkou a malou měřicí trubicí (sériové zapojení s generátorem signálu B&K 2706 a dvoukanálovým analyzátozem PULSE B&K 3560-B-030) [18]</i>	39
<i>Obr. 13. Analyzátor typu B&K 2146 pro měření akustického útlumu a čtvrtpalcový mikrofon typu B&K 4190 [18]</i>	40
<i>Obr. 14. Zředění akustické energie vlivem překážky [vlastní zpracování]</i>	40
<i>Obr. 15. PULSE typ 3560-B-030 [18].....</i>	41
<i>Obr. 16. Prostředí LabShop[18]</i>	41
<i>Obr. 17. Zobrazení koeficientu zvukové pohltivosti a odrazivosti pro 1 cm celistvého vzorku se vzduchovou mezerou 1cm, 2 cm a 3 cm.....</i>	44
<i>Obr. 18. Zobrazení koeficientu zvukové pohltivosti a odrazivosti pro 2 cm celistvého vzorku se vzduchovou mezerou 1cm, 2 cm a 3 cm.....</i>	44
<i>Obr. 19. Zobrazení koeficientu zvukové pohltivosti a odrazivosti pro 1 cm perforovaného vzorku s 1cm, 2 cm a 3 cm vzduchovou mezerou</i>	45
<i>Obr. 20. Zobrazení koeficientu zvukové pohltivosti a odrazivosti pro 2 cm perforovaného vzorku, který byl z 1 cm perforován a ve 2 cm byl celý s 1cm, 2 cm a 3 cm vzduchovou mezerou</i>	45

<i>Obr. 21. Zobrazení koeficientu zvukové pohltivosti a odrazivosti pro 2 cm vzorku, který byl perforován skrz celý s 1cm, 2 cm a 3 cm vzduchovou mezerou.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 22. Zobrazení koeficientu zvukové pohltivosti a odrazivosti pro 1 cm vlnitého vzorku s 1cm, 2 cm a 3 cm vzduchovou mezerou.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 23. Zobrazení koeficientu zvukové pohltivosti a odrazivosti pro děrovaný, vlnitý a celistvý materiál</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 24. Zobrazení hladiny akustického tlaku pro zdroj - vrtačku.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 25. Zobrazení hladiny akustického tlaku pro zdroj, který byl v krabici</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 26. Zobrazení hladiny akustického tlaku pro krabici, která byla vystlána 1 vrstvou</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 27. Zobrazení hladiny akustického tlaku pro krabici, která byla vystlána 2 vrstvami PUR</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 28. Zobrazení hladin akustického tlaku pro krabici a krabici s 1 vrstvou PUR</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 29. Rozdíl hladin akustických tlaků krabice a krabice s 1 vrstvou PUR.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 30. Zobrazení hladiny akustického tlaku pro krabici a krabici se 2 vrstvami PUR</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 31. Rozdíl hladin akustických tlaků pro krabici s 1 vrstvou a krabici se 2 vrstvami PUR</i>	<i>51</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Rozdíl velikostí akustického tlaku a hladin akustického tlaku v závislosti na změně prostředí</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 2. Mechanické vlastnosti PUR - S3535F [10], [12]</i>	<i>37</i>