



Doc. Ing. Richard NOVÝ, CSc.
 ČVUT v Praze, Strojní fakulta,
 Ústav techniky prostředí

Tlakové ztráty tlumičů hluku

Pressure Losses of Noise Silencers

Recenzent
 prof. Ing. Karel Hemzal, CSc.

Článek se zabývá problematikou komplexního návrhu tlumiče hluku pro vzduchotechnická zařízení. Tlumiče hluku pro vzduchotechnické potrubní systémy v naprosté většině případů pracují na absorpčním principu. Používají se kulisové tlumiče obdélníkového průřezu, které dosahují vyšších útlumů než tlumiče průřezu kruhového. Za hlavní parametr se u tlumičů považuje vložný útlum hluku v konkrétním kmitočtovém pásmu. Řada projektantů však zapomíná na další důležitý parametr, kterým je tlaková ztráta. Autor věnuje hlavní pozornost správnému určení tlakové ztráty a současně naznačuje možnosti snížení tlakové ztráty aerodynamickými úpravami na náběžné a odtokové straně pohltivých kulis. V článku je ukázán optimální postup při výběru tlumiče podle parametru kvality, který zohledňuje jak útlum hluku v konkrétním kmitočtovém pásmu, tak i parametr tlakové ztráty, kterým je součinitel místní tlakové ztráty tlumiče.

Klíčová slova: absorpční tlumič, tlakové ztráty

The article deals with problems related to a comprehensive design process of a noise silencer for HVAC applications. Noise silencers for HVAC duct systems are mostly based on absorption principle. Better noise attenuation can be achieved with rectangular silencers, when compared to circular types. Dynamic insertion loss in particular frequency range is considered to be the main characteristic for HVAC noise silencers. However, a lot of designers forget the next important parameter – the pressure loss. The author focuses on the correct determination of pressure loss and describes possibilities of pressure loss reduction achieved by aerodynamic modifications on the leading and trailing edge of absorptive baffles. There is shown an optimal approach for choosing the silencer according to a quality criterion, which takes into account both noise attenuation in particular frequency range and pressure loss criterion, which is defined in the silencer local pressure loss coefficient.

Keywords: absorption noise silencer, pressure loss

1. ÚVOD

Tlumiče hluku pro vzduchotechnické potrubní systémy v naprosté většině případů pracují na absorpčním principu. Jedná se obvykle o tlumiče obdélníkového průřezu, protože se z hlediska útlumu akustických vln dosahuje u kulisových tlumičů vyšších útlumů než u tlumičů průřezu kruhového, což je možno dokumentovat výpočetními vztahy pro útlum v oblasti nízkých kmitočtů.

Nejdůležitější z hlediska spektra hluku ventilátorů je oblast v kmitočtových oktávových pásmech 63, 125, 250 a 500 Hz.

Pro tuto frekvenční oblast a tlumič obdélníkového průřezu můžeme stanovit útlum hluku D [dB] dle vztahu

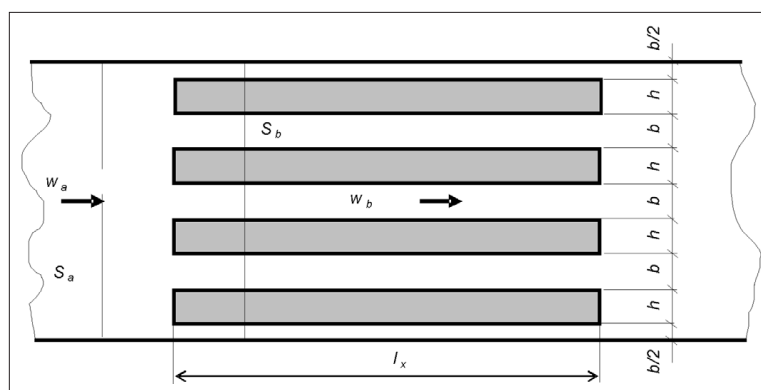
$$D = 2,2 \cdot \alpha \frac{l_x}{b} \quad (1)$$

kde
 α [-] součinitel pohltivosti stěn (kulis) tlumiče jako funkce kmitočtu a tloušťky kulisy h ,
 l_x [m] délka tlumiče,
 b [m] šířka mezery mezi kulisami (obr.1),
 h [m] tloušťka pohltivé kulisy.

Součinitel pohltivosti stěn kulisy je dán akustickými kvalitami materiálu náplně kulisy a její tloušťkou h .

S tloušťkou kulisy činitel pohltivosti narůstá a to tak, že se křivky pohltivosti posouvají směrem k nižším kmitočtům.

V oblasti nejnižších kmitočtových pásem je podmínkou dostatečného útlumu velká tloušťka kulis.



Obr. 1 Schéma absorpčního kulisového tlumiče hluku obdélníkového průřezu

Nutno zdůraznit, že výsledný útlum hluku v daném kmitočtovém pásmu je poněkud vyšší než ukazuje vztah (1) a to vlivem náhlé změny průřezu kanálu.

Pro tlumič kruhového průřezu dle obr. 2 by platil výpočetní vztah

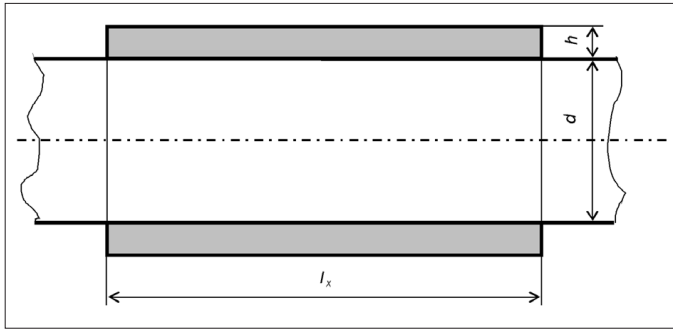
$$D = 1,1 \cdot \alpha \frac{O}{S} l_x \quad (2)$$

kde
 O [m] obvod vnitřního průřezu tlumiče ($O = \pi \cdot d$),
 S [m²] průřez tlumiče.

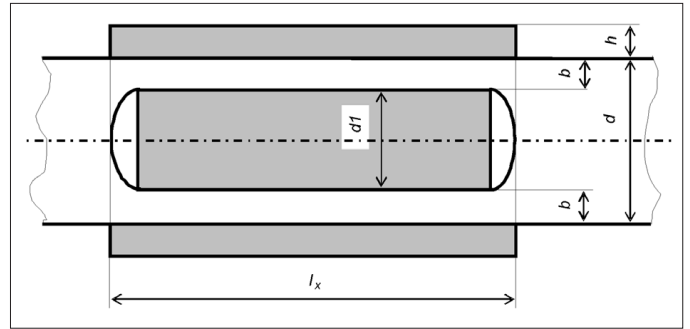
Dosažením za obvod a průřez se získá výpočetní vztah

$$D = 1,1 \cdot \alpha \frac{4 \cdot \pi \cdot d}{\pi \cdot d^2} l_x = 4,4 \cdot \alpha \frac{l_x}{d} \quad (3)$$

kde
 d [m] vnitřní průměr tlumiče.



Obr. 2 Absorpční tlumič kruhového průřezu



Obr. 3 Absorpční tlumič kruhového průřezu s vnitřním pohltivým tělesem

Ze vztahu (3) je zřejmé, že útlum hluku velmi rychle klesá se zvětšujícím se průměrem tlumiče. Někteří výrobci vkládají do tlumiče kruhového průřezu různá pohltivá tělesa. Nejběžnější uspořádání tohoto řešení je naznačeno na obr. 3. Pokud se do tlumiče kruhového průřezu vloží pohltivé těleso, tak se toto řešení přiblíží po stránce útlumu tlumiči kulisovému, kde šířka mezery mezi vnějším a vnitřním pohltivým povrchem možno označit za šířku b [m]. Útlum hluku sice naroste, ale výrazně vzroste tlaková ztráta.

Jak je z uvedeného zřejmé rozhodují rozměry b u kulisového tlumiče a průměr d u tlumiče kruhového průřezu nejenom o útlumu hluku, ale také o velikosti tlakových ztrát při průtoku vzduchu tlumičem.

Z praxe je známo, že někteří výrobci tlumičů hluku uvádějí celkem spolehlivé údaje o útlumu hluku jimi vyráběných tlumičů různých rozměrů. Naopak v řadě případů je možno s úspěchem pochybovat o hodnotách tlakových ztrát těchto výrobků. Přitom, jak bude v dalším prokázáno, mají hodnoty tlakových ztrát tlumičů hluku velký vliv na dimenzování ventilátorů, na příčný rozměr potrubí, cenu tlumičů apod.

2. PRŮŘEZ TLUMIČE

Při návrhu tlumiče každý projektant se hlavně zaměřuje na získání potřebného útlumu hluku v daném kmitočtovém pásmu. Průřez tlumiče se často volí podle rychlosti proudění vzduchu volným průřezem tlumiče. Tímto postupem se obvykle nedosáhne optimálního řešení. Dáme-li do souvislosti útlum hluku v daném kmitočtovém pásmu s tlakovou ztrátou, můžeme dosáhnout optimálního návrhu průřezu tlumiče.

Celkový útlum tlumiče můžeme vyjádřit vztahem

$$D = D_1 \cdot l_x \quad (4)$$

kde D_1 je [dB/m] útlum jednoho délkového metru tlumiče ($D_1 = 2,2 \frac{\alpha}{b}$).

Tlakovou ztrátu tlumiče vyjadřujeme známým vztahem

$$\Delta p_T = \xi_{bT} \frac{w_b^2}{2} \rho \quad (5)$$

kde ξ_{bT} [-] součinitel místní tlakové ztráty tlumiče, definovaný pro průřez S_b , w_b [m/s] rychlost proudění vzduchu ve jmenovitém průřezu tlumiče, kterou lze stanovit z rovnice kontinuity.

$$V = w_b \cdot S_b = w_a \cdot S_a \quad (6)$$

U řady výrobců je součinitel místní tlakové ztráty tlumiče uváděn jako nezávislý na délce tlumiče, což neodpovídá realitě. Součinitel místní

tlakové ztráty tlumiče ξ_{bT} možno vyjádřit jako funkci závislou na délce tlumiče

$$\xi_{bT} = \xi_{b1} \cdot l_x \quad (7)$$

kde ξ_{b1} je [-] součinitel místní tlakové ztráty tlumiče o délce $l_x = 1$ m, vztaheno na rychlost v průřezu S_b .

Pokud se doplní rovnice (5) posledním výrazem pro součinitel místní tlakové ztráty tlumiče, získá se výraz

$$\Delta p = \xi_{b1} \cdot l_x \frac{V^2}{S_b^2} \frac{\rho}{2} = \xi_{a1} \cdot l_x \frac{V^2}{S_a^2} \frac{\rho}{2} \quad (8)$$

V případě, že by byl zájem o vztahení tlakových ztrát na průřez S_a , tak je nutné uplatnit přepočítání součinitele tlakové ztráty tlumiče ξ_{bT} na hodnotu ξ_{aT} podle vztahu

$$\xi_{aT} = \xi_{bT} \left(\frac{S_a}{S_b} \right)^2 \quad (9)$$

Dosažením do vztahu (8) z rovnice (4) a úpravami lze získat výpočetní vztah pro stanovení průřezu tlumiče.

$$S_b = V \sqrt{\frac{\rho}{2} \frac{D}{\Delta p_T} \frac{\xi_{b1}}{D_1}} \quad (10)$$

resp. pro průřez S_a bude platit vztah

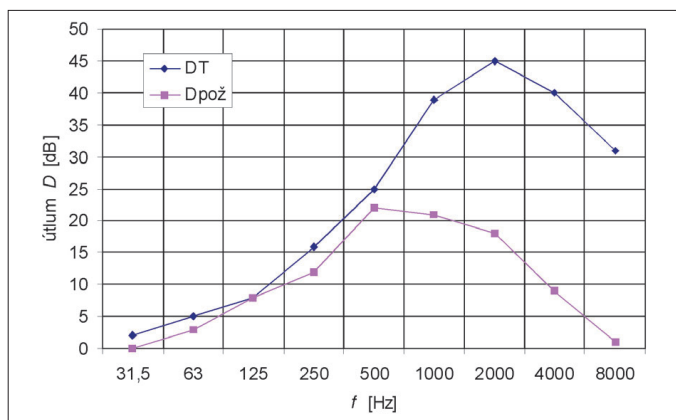
$$S_a = V \sqrt{\frac{\rho}{2} \frac{D}{\Delta p_T} \frac{\xi_{a1}}{D_1}} \quad (11)$$

kde D [dB] požadovaný útlum hluku v daném kritickém kmitočtovém pásmu, D_1 [dB] útlum tlumiče o délce 1 m (v kritickém kmitočtovém pásmu), Δp_T [Pa] maximálně přípustná tlaková ztráta tlumiče.

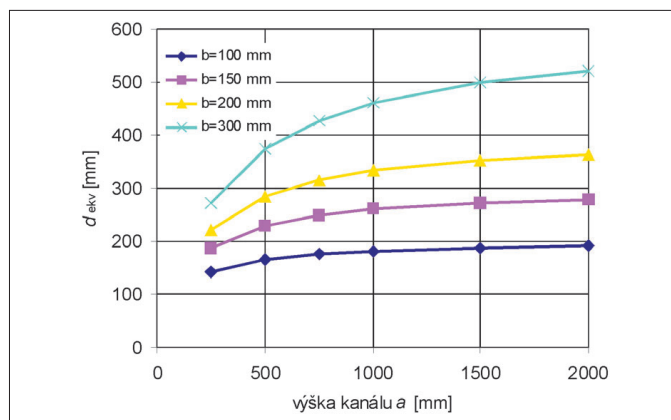
Průřez S_a je oproti průřezu S_b větší o kulisy vložené do vzduchotechnického kanálu.

Za kritického kmitočtového pásma se počítá to pásmo, ve kterém je požadovaný útlum na hranici možnosti daného tlumiče. Lze to dokumentovat příkladem uvedeným na diagramu v obr. 4. Je zde porovnáván útlum tlumiče určitých rozměrů D_T [dB] s požadovaným útlumem tlumiče D_{poz} [dB].

V každém případě musí být spektrum útlumu použitého tlumiče ležet výše než útlum požadovaný. Kmitočet ve kterém došlo k rovnosti útlumů je kmitočtem kritickým.



Obr. 4 Ukázka určení kritického kmitočtového pásma, kmitočty 125 Hz



Obr. 5 Ekvivalentní průměry mezer kulisových tlumičů při různé šířce kanálu b a různé výšce kulisy a

V praxi se ukazuje, že je vhodné vztahovat tlakové ztráty na jmenovitý průřez tlumiče S_a a nikoliv na průřez mezi kulisami. Bohužel většina výrobců uplatňuje opak, protože opticky se jeví hodnoty součinitelů tlakové ztráty ξ_{bT} výrazně menší než součinitel ξ_{aT} platné pro průřez S_a , jak plyne ze vztahu (9).

V poslední části výrazu (11) je skryt číselný koeficient kvality tlumiče K , který má tvar

$$K = \sqrt{\frac{D_1}{\xi_{a1}}} \quad (12)$$

Podle této veličiny lze porovnávat kvalitu jednotlivých typů tlumičů hluku.

3. TLAKOVÉ ZTRÁTY

3.1 Kulisový tlumič

Při pohledu na schéma absorpčního kulisového tlumiče (v obr. 1) je zřejmé, že na tlakové ztrátě se uplatňují tři základní složky. Tlaková ztráta náhlým zúžením na vstupu vzduchu do tlumiče, tlaková ztráta náhlým rozšířením na výstupu vzduchu z tlumiče a tlaková ztráta třením vzduchu v průřezu tlumiče.

Dle publikovaných podkladů, [1], lze tlakovou ztrátu náhlým zúžením průřezu určit ze vztahu pro součinitel místní tlakové ztráty

$$\xi_a = 0,5 \left(1 - \frac{b}{b+h} \right)^{3/4} \quad (13)$$

Tlakovou ztrátu náhlým rozšířením lze vyjádřit vztahem

$$\xi_b = \left(1 - \frac{b}{b+h} \right)^2 \quad (14)$$

Součinitel tlakové ztráty třením vzduchu mezi kulisami obecně závisí na hodnotě podobnostního čísla Re a drsnosti stěn kanálu. Reynoldsovo číslo se stanoví ze vztahu

$$Re = \frac{w_b \cdot d_{ekv}}{\nu} \quad (15)$$

kde ekvivalentní průměr kanálu je dán vztahem

$$d_{ekv} = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a+b} \quad (16)$$

Šířka kulisy (výška kanálu) a je několikanásobně větší hodnota než mezera mezi kulisami b . Pro běžné rozměry tlumičů je tato závislost vyjádřena v obr. 5.

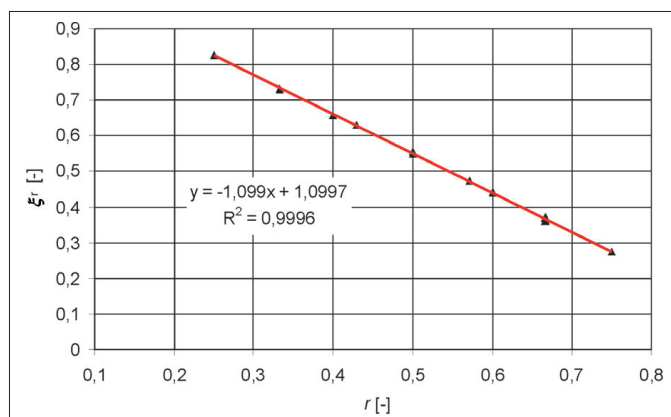
Rychlost proudění vzduchu mezi kulisami by neměla být vyšší než 15 m/s. U kulis, jejichž povrch není tvořen perforovaným plechem je bezpečná rychlost proudění nižší než 12 m/s. Při vyšších rychlostech dochází aerodynamickými účinky k vysávání pohltivého materiálu do průtočného kanálu, čímž se vyvolá téměř řetězová reakce, zúží se kanál, stoupne rychlost proudění vzduchu, klesne statický tlak a pohltivý materiál se vysouvá ve větší míře. Dramaticky tím stoupnou hydraulické odpory. Kulisy po takové expozici se obvykle nevrátí do původního tvaru a kulisy je nutno vyměnit.

Stanovení součinitele tření λ závisí kromě Re čísla na drsnosti stěn. Nejčastěji se používá perforovaný plech k překrytí pohltivého materiálu uvnitř kulis. K reálné hodnotě drsnosti je možné dospět pouze experimentem. Při rozsahu rychlostí proudění vzduchu mezi kulisami od 4 do 15 m/s bude Re číslo v rozsahu cca 14 000 až 670 000.

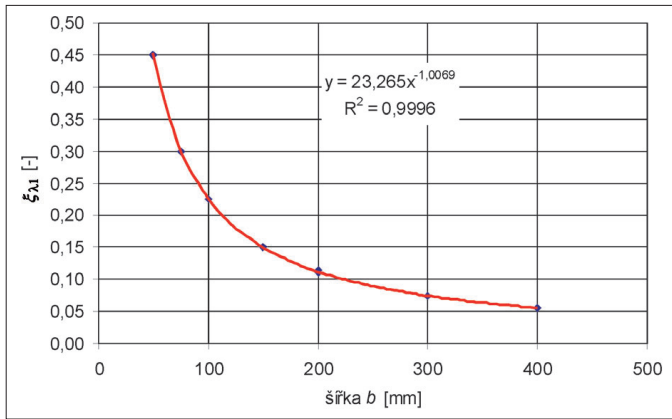
Na základě měření tlakových ztrát kulisových tlumičů hluku byly získány informace o celkovém součiniteli místní tlakové ztráty, který v sobě zahrnuje vliv tlakové ztráty náhlým zúžením, náhlým rozšířením a tlakovou ztrátu třením vzduchu v kanálu.

Celkový součinitel místní tlakové ztráty kulisového tlumiče hluku lze na základě vyhodnocení experimentů rozdělit do dvou položek.

$$\xi_T = \xi_r + \xi_z \quad (17)$$



Obr. 6 Závislost místní tlakové ztráty kulisového tlumiče na poměrném zúžení r



Obr. 7 Závislost součinitele $\xi_{\lambda 1}$ na ekvivalentním průměru

První část ξ_r , závislou na poměrné změně průřezu (náhlé zúžení, náhlé rozšíření), lze vyjádřit jako lineární funkci závislou na parametru r [-]

$$r = \frac{b}{b+h} \quad (18)$$

regresním vztahem

$$\xi_r = -1,099 \cdot \left(\frac{b}{b+h}\right) + 1,0997 \quad (19)$$

Tomu odpovídá graf na obr. 6.

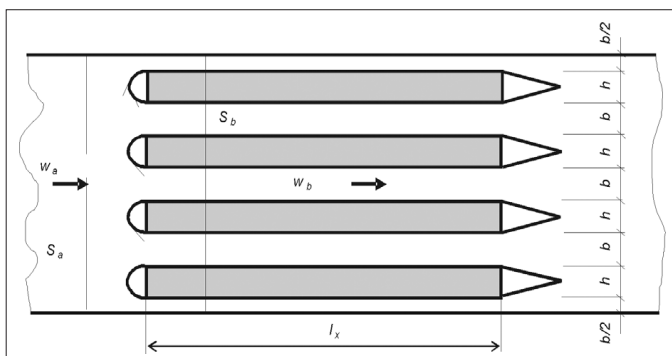
Tlaková ztráta třením v kanálu mezi kulisami obecně závisí na délce tlumiče l_x [m], ekvivalentním průměru kanálu mezi kulisami d_{ekv} [mm], drsnosti povrchu kanálu a Re čísla. Vliv Re čísla není z naměřených hodnot prokazatelný, resp. je statisticky nevýznamný. Při experimentech nebylo možné z důvodů nákladnosti měnit výšku kulis a a proto i hodnota ekvivalentního průměru se měnila pouze se šířkou mezery mezi kulisami. Výška kulisy při experimentech byla $a = 500$ mm.

Jak je zřejmé z diagramu na následujícím obr. 7, který byl sestaven na základě experimentálně zjištěných dat, lze kvalifikovaně odhadnout součinitel tlakové ztráty $\xi_{\lambda 1}$ vztahený na 1 metr délky tlumiče z výpočetního vztahu

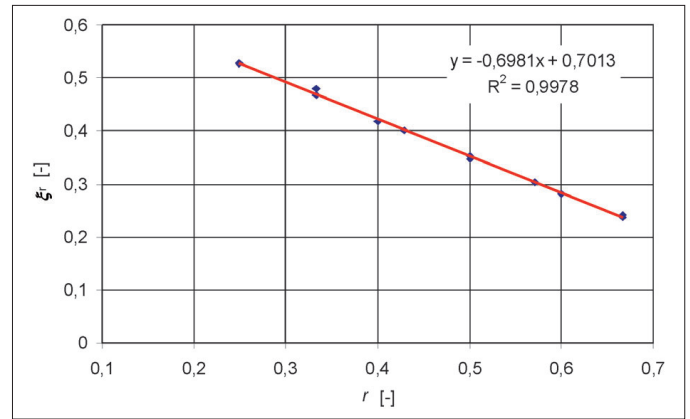
$$\xi_{\lambda 1} = 23,265 \cdot b^{-1,0069} \quad (20)$$

3.2 Aerodynamické úpravy

Existuje celá řada případů, kdy k dopravě vzduchu jsou použity nízkotlaké ventilátory, které se vyznačují nízkými dopravními tlaky, takže je zájem o tlumiče hluku s nižší tlakovou ztrátou. Někteří výrobci to řeší tvarováním kulis na náběžné i odtokové straně.



Obr. 8 Kulisový tlumič s náběhovými plechy



Obr. 9 Součinitel místní tlakové ztráty v závislosti na poměrné změně průřezu r kulisového tlumiče s náběhovými plechy

Příklad upravené kulisy na náběžné straně vložením poloviny válce a na odtokové straně klínovým přechodem, je znázorněn na obr. 8. Tato úprava se hlavně projeví snížením součinitele odporu vlivem náhlé změny průřezu ξ_r [-]. Na základě kontrolních měření byl stanoven průběh součinitele v závislosti na poměrné změně průřezu, jak je dokumentováno na obr. 9.

Uvedená úprava má velice příznivý vliv na snížení součinitele místního odporu vlivem náhlé změny průřezu. Jedná se o významné snížení tlakové ztráty a to v celku cca o 21 %.

4. ZÁVĚR

Aerodynamických úprav ve smyslu snížení jejich tlakových ztrát může být celá řada. Nutno však sledovat nejenom snížení tlakové ztráty, ale i vliv dané aerodynamické úpravy na vložný útlum tlumiče hluku. Kdyby totiž bylo přijato takové řešení na straně vtoku a výtoku vzduchu z kanálu mezi kulisami, že by místní tlaková ztráta vlivem změny průřezu klesla na nulovou hodnotu, tak by byla ztracena ta část útlumu hluku, která souvisí se změnou průřezu kanálu.

Úpravy tlumičů hluku obecně musí sledovat optimální řešení, které lze kontrolovat na základě činitele kvality podle vztahu (12).

Shora uvedené poznatky je možno uplatňovat i při návrhu tlumičů do kouřovodů plynových kotlů. Rozdíly budou spočívat pouze ve změně hustoty protékající vzdušiny a s důrazem na použití nerezavějících materiálů pro výrobu pohltivých kulis, neboť spaliny mají vysoký obsah vodních par a je reálné nebezpečí jejich kondenzace uvnitř tlumičů.

Článek byl vypracován s podporou výzkumného záměru VZ MSM6840770011.

Použité zdroje:

- [1] Nový R. a kol.: Technika prostředí, Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005,
- [2] Nový R.: Hluk a chvění, Vydavatelství ČVUT v Praze, 2000, ISBN 80-01-01306-5
- [3] Kurze U.J.: Wirksamkeit von Schalldämpfern im Einsatzfall, 1994, Müller-BBM GmbH Múnchen.