

doc. Ing. Richard NOVÝ, CSc.
Ing. Miroslav KUČERA, Ph.D.
ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
Ústav techniky prostředí

Hluk vyzařovaný komíny

Noise Emitted by Chimneys

Recenzent
Ing. Ladislav Mička

Článek pojednává o vyzařování hluku z komínů a vzduchotechnických výfuků vzduchu do volného prostoru. Komíny se obvykle rozumí svislé kouřovody určené k odvodu spalín od spalovacích zařízení. Příspěvek se nezabývá pouze tímto případem, ale rozšiřuje se na obecná zakončení svislých potrubních systémů směrem do atmosféry, je tedy řešen i případ odvodu znehodnoceného vzduchu do venkovního prostředí potrubím určité dimenze.

Klíčová slova: akustika, hluk, vytápění, vzduchotechnika, komíny

The paper deals with the emission of noise from chimneys and air-conditioning exhausts in the free space. Chimneys in general are vertical flue ducts designed to remove flue gases from combustion devices. The paper does not only address these cases, but extends to the termination of vertical piping systems into the atmosphere in general, addressing also the case of the discharge of degraded air into the outdoor environment through a pipeline of a certain dimension.

Keywords: acoustics, noise, heating, air conditioning, chimneys

ÚVOD

V úvodu je vhodné definovat základní veličiny užívané v akustice. Hladina akustického výkonu L_w [dB] představuje vlastnost zdroje, tedy akustickou energii, kterou zdroj vyzařuje do svého okolí. Naproti tomu hladina akustického tlaku L_p [dB] určuje stav prostředí v daném místě a její nedílnou součástí je informace, v jaké vzdálenosti od zdroje zvuku byla stanovena.

Problematiku vyzařování hluku z konce potrubního systému do volného prostoru je možné rozdělit na dílčí úlohy:

- ☐ zdrojem hluku je spalovací proces v kotli, nebo hluk ventilátoru vyzařovaný do výtlačného potrubí,
- ☐ zdrojem hluku je turbulentní proudění vzduchu v potrubí, generující aerodynamický hluk uvnitř vzduchovodu,

- ☐ aerodynamický hluk vyzařovaný do volného prostoru v důsledku turbulentního proudění vytékajícího vzduchu nebo spalín,
- ☐ hluk vyzařovaný z povrchu potrubí nebo kouřovodu.

Z uvedeného je zřejmé, že v praxi mohou nastat různé kombinace z pohledu rozhodujících příčin nadměrně vyzařovaného hluku do venkovního prostoru.

HLUK VYZAŘOVANÝ ZDROJEM DO POTRUBNÍHO SYSTÉMU

Nejprve je třeba určit výkonnost zdroje hluku, který vyzařuje akustický signál do zvukovodu, jenž je představován potrubím, nebo v případě kotlen kouřovodem. U vzduchotechnických systémů se obvykle jedná o generování kmitočtově spojitého akustického signálu z výtlačného hrdla ventilátoru. O jeho akustickém výkonu v závislosti na dopravním tlaku a dopravovaném objemu vzdušiny byla publikována řada informací [9]. Výrobci ventilátorů v současnosti podávají vyčerpávající informace o generovaném hluku do sacího nebo výtlačného potrubí.

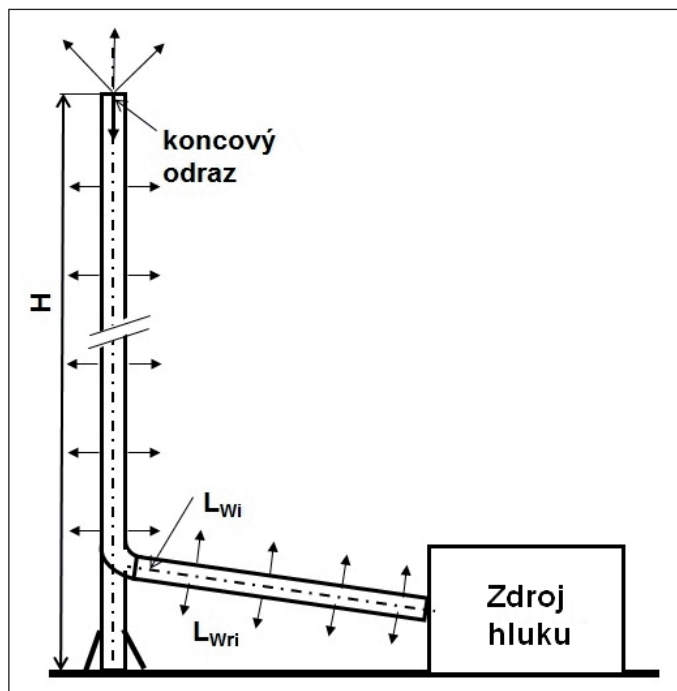
Podstatně méně relevantních informací lze získat o generaci hluku ze spalovacích zařízení, jako jsou např. kotle pro vytápění. Užitečné informace nalezne čtenář v lit. [6] a [10].

HLUK VYZAŘOVANÝ TURBULENTNÍM PROUDĚNÍM V POTRUBÍ

Shora uvedené informace o vyzařování hluku do potrubí (kouřovodů) by měly být vždy uváděny v závislosti na kmitočtu. V dnešní době není problém pracovat s údaji v třetinooktávových kmitočtových pásmech. Pro řešení úloh spojených se snižováním hluku bude stačit i výpočet v oktávových pásmech.

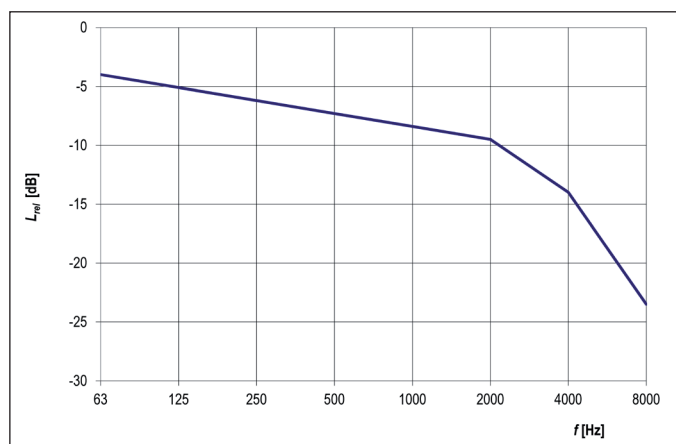
S přihlédnutím k řadě vedlejších efektů při šíření hluku potrubím (viz dále) je možné problematiku hluku v komplexu shrnout do schematického nákresu na obr. 1.

Ze schématu je patrné, že akustický výkon přicházející od zdroje hluku do potrubí se dělí na řadu vedlejších částí, resp. je do potrubí vyzařován dodatečný signál v důsledku turbulentního proudění vzdušiny (spalín) jednotlivými elementy potrubního systému. Hladina akustického výkonu L_{wri} představuje signál, který je vyzařován pláštěm potrubí a hladina akustického výkonu uvnitř potrubí je pak dána hodnotou L_{wi} .



Obr. 1 Schéma generace hluku z komínu

Fig. 1 Chimney noise emission scheme



Obr. 2 Relativní spektrum hluku, které vzniká v přímém potrubí v důsledku turbulentního proudění [9]

Fig. 2 Relative spectrum of noise that occurs in a direct pipeline due to the turbulent flow [9]

Je nutné připomenout, že každý element potrubí vykazuje určitý útlum hluku v jednotlivých kmitočtových pásmech a současně je v důsledku turbulentního proudění vzduchu (spalin) i zdrojem dílčího akustického výkonu.

Prvním případem je turbulentní proudění vzduchu (spalin) přímým potrubím. Celkovou hladinu akustického výkonu L_w [dB], která se generuje v potrubí, lze u tohoto případu kvantifikovat vztahem

$$L_w = 50 \log w + 10 \log S + 10 \quad (1)$$

kde je:

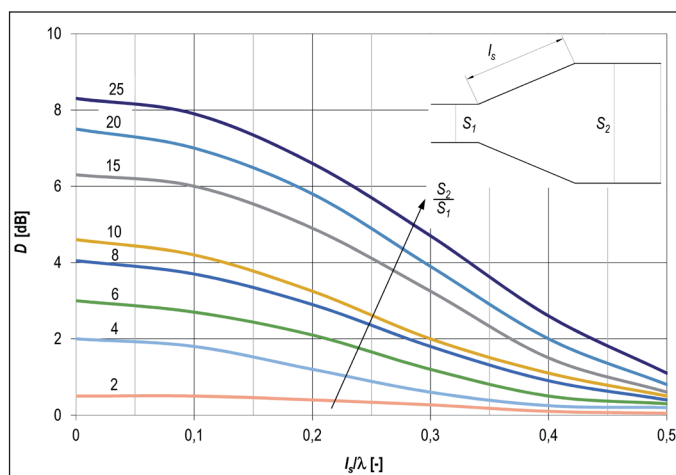
w rychlost proudění vzduchu (spalin) [m/s],
 S průřez potrubí [m²].

Je zřejmé, že při zvýšení rychlosti proudění na dvojnásobek vzroste celková hladina akustického výkonu o 15 dB.

Kmitočtové složení generovaného hluku lze stanovit na základě znalosti relativního spektra, které je obsahem diagramu na obr. 2.

Hladina akustického výkonu v oktaóvovém pásmu L_{wi} [dB] se určí ze vztahu

$$L_{wi} = L_w + L_{rel} \quad (2)$$



Obr. 3 Útlum reflexí v místě plynulé změny průřezu potrubí [9]

Fig. 3 Attenuation by reflection at the point of gradual change of pipe diameter [9]

kde je:

L_w celková hladina akustického výkonu v potrubí [dB] určená ze vztahu (1),
 L_{rel} relativní hladina akustického výkonu v potrubí závislá na kmitočtu [dB].

Podobným způsobem je možné popsat vyzařování hluku v jiných částech potrubního systému, jako jsou kolena, oblouky, změny průřezu potrubí apod. V technické literatuře [4], [9], [11], [14] jsou popsány závislosti vyzařování hluku v místě daného elementu. Při použití tlumičů hluku do potrubí se uvádí běžně jejich útlum. Bohužel se často zapomíná, že i samotný tlumič je z aerodynamického hlediska rušivým elementem, což vede pro laika často k nepochopení, že je tlumič zdrojem dodatečného hluku. Ve skutečnosti jde pouze o snížení hodnoty jeho útlumu vlivem proudění vzduchu mezi kulisami tlumiče.

PŘIROZENÉ ÚTLUMY HLUKU V POTRUBÍ

Ze schématu na obr. 1 vyplývá, že dochází v různých místech potrubního systému k útlumu hluku. Např. v místě náhlé změny průřezu potrubí dojde k útlumu hluku odrazem akustické energie nazpět ke zdroji. Při náhlé změně průřezu potrubí z hodnoty S_1 na S_2 se jedná o útlum D [dB]

$$D = 10 \log \frac{(S_1/S_2 + 1)^2}{4S_1/S_2} \quad (3)$$

Ze vztahu (3) je patrné, že útlum není funkcí kmitočtu.

Z hlediska aerodynamického je lepším řešením kuželový přechod, který vykazuje menší hydraulické ztráty a přijatelný útlum hluku v oblasti nízkých kmitočtů, jak je dokumentováno na obr. 3, kde l_p [m] je délka površky přechodu a λ je vlnová délka signálu, který se šíří potrubím a platí pro ni vztah $\lambda \cdot f = c$. Veličina c [m/s] představuje rychlosti šíření zvuku.

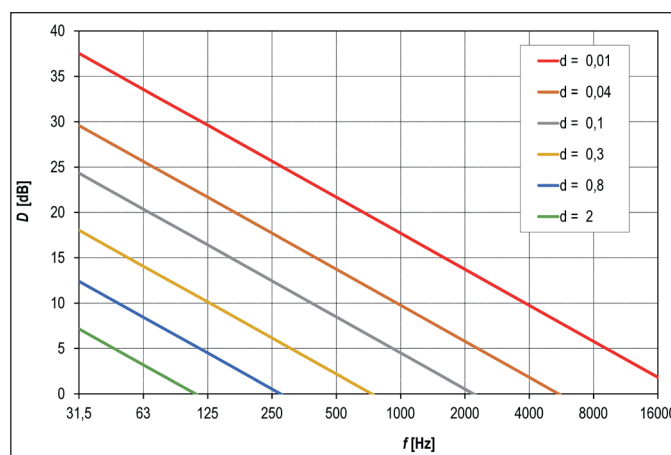
K extrémní změně průřezu potrubí dochází na konci potrubí. Šíření zvuku z potrubního systému do volného prostoru je spojeno s tzv. koncovým odrazem akustické energie nazpět ke zdroji zvuku. Do volného prostoru pronikne pouze část akustické energie. Tento efekt je kmitočtově závislý [9], [14]. Tzv. koncový odraz, resp. koncový útlum D_i [dB] je možné vyjádřit vztahem

$$D_i = 30,9 - 13,2 \log(f \cdot d) \quad (4)$$

kde je:

d průměr potrubí [m],
 f kmitočet [Hz].

Jeho grafické znázornění je uvedeno na diagramu, viz obr. 4.



Obr. 4 Útlum hluku koncovým odrazem v závislosti na průměru potrubí d [m]

Fig. 4 Noise attenuation by the end reflection in dependence on pipe diameter d [m]

Do volného prostoru bude vlivem tohoto efektu vyzářena pouze část spektra akustického výkonu, který je generován např. z kotle nebo jiného zdroje připojeného na potrubí.

Pro projektanta je často tato část přirozeného útlumu zachránou při výpočtech šíření hluku směrem do chráněného prostoru, neboť hluk generovaný např. z kotlů, popřípadě i z ventilátorů má svá maxima v oblasti nízkých kmitočtových pásem, kde ostatní přirozené útlumy hluku vykazují minimální hodnoty.

VYZAŘOVÁNÍ HLUKU Z PLÁŠTĚ POTRUBÍ

Při navrhování kotelen v dnešní době je výjimkou použití zděného komínu, který díky své hmotnosti (zdíva) vykazuje velkou neprůzvučnost směrem do venkovního prostoru a není proto nutné se zabývat vyzářováním z povrchu kouřovodu. Moderní kouřovody bývají lehká dvouplášťová potrubí, jejichž vzduchová neprůzvučnost není srovnatelná se zděnými komíny a zejména v nižším kmitočtovém pásmu nevykazují dobrý útlum hluku.

V důsledku toho dochází ke generaci hluku do exteriérů také pláštěm komínu. Je to způsobeno nízkou neprůzvučností a kmitáním povrchu komínu. Schematické znázornění generace hluku z pláště komínu je zobrazeno na obr. 5.

Akustický výkon generovaný z pláště potrubí je možno kvantifikovat rovnicí

$$L_{Wri} = L_{Wi} + 10 \log \left(\frac{A_0}{A_i} \right) - R_{out,i} \quad (5)$$

kde je:

L_{Wi} hladina akustického výkonu uvnitř potrubí v daném kmitočtovém pásmu [dB],

L_{Wri} hladina akustického výkonu generovaná do exteriéru v daném kmitočtovém pásmu [dB],

$R_{out,i}$ vzduchová neprůzvučnost potrubí v daném kmitočtovém pásmu [dB],

A_i vnitřní průřez potrubí [m²],

d vnitřní průměr potrubí [m],

A_0 plocha vytčeného úseku potrubí [m²]; $A_0 = \pi \cdot d \cdot l$,

l délka kouřovodu [m].

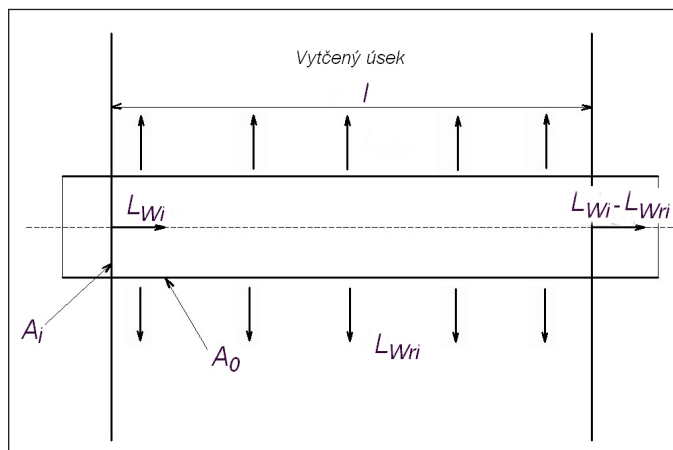
U zaizolovaného potrubí lze ve výpočtu plochy A_0 uvažovat střední průměr. Při výpočtech je třeba vhodně volit délku vytčeného úseku l vzhledem k průměru potrubí d . Možno volit například $l = 1$ m. Nutno poznamenat, že vztah (5) je možné použít v případě, že je splněna podmínka

$$R_{out,i} \gg 10 \log \left(\frac{A_0}{A_i} \right)$$

Kontrola tohoto způsobu šíření hluku z potrubí je závažná v důsledku toho, že se jedná o lineární zářič akustické energie. Pro tento typ zářičů je typická vlastnost, že hladina akustického tlaku klesá se vzdáleností pouze o 3 dB při zdvojnásobení vzdálenosti. Řada techniků tuto skutečnost nerespektuje, čímž dochází k velkým chybám při výpočtu ochranných vzdáleností.

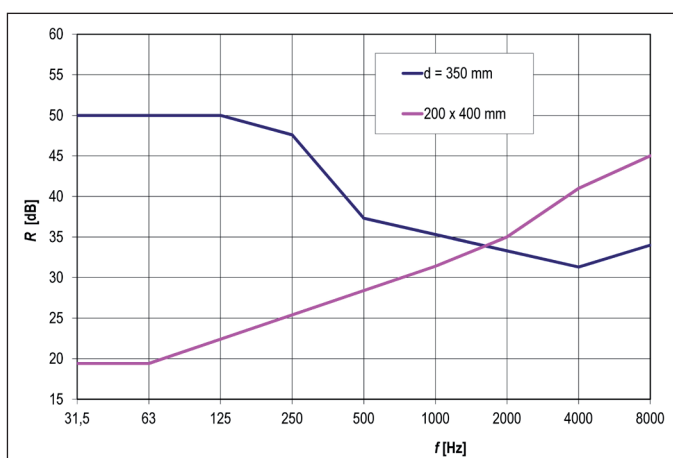
Určení neprůzvučnosti pláště potrubí není jednoduchá záležitost. Je velký rozdíl mezi potrubím kruhového průřezu a potrubím obdélníkového průřezu. Většinou se v dnešní době používají potrubí kruhového průřezu, která vykazují výrazně lepší průběh neprůzvučnosti na kmitočtové ose, jak je možné kontrolovat v diagramech na obr. 6.

Potrubí kruhového průřezu vykazuje velkou vzduchovou neprůzvučnost v nízkých kmitočtových pásmech, což je žádoucí, protože spektrum vy-



Obr. 5 Schematické znázornění vyzářování hluku z povrchu potrubí

Fig. 5 Schematic illustration of noise emission from the surface of a pipe



Obr. 6 Porovnání neprůzvučnosti kruhového $d = 350$ mm a obdélníkového potrubí 200×400 mm

Fig. 6 Comparison of sound-transmission loss of circular $d = 350$ mm and rectangular 200×400 mm pipes

žářovaného hluku uvnitř potrubí má také maxima v této kmitočtové oblasti. Významnou měrou se na hodnotě vzduchové neprůzvučnosti projevuje vliv izolace, kterou je potrubí obaleno. Nevhodně zvolenou izolací se pásmo s nízkým útlumem posouvá k nižším kmitočtům. U potrubí obdélníkového průřezu mají stěny nízkou hodnotu vzduchové neprůzvučnosti v oblasti nízkých kmitočtových pásem, kde se projevuje vliv tuhosti potrubí, což je výraznou nevýhodou. Nevýhodou je také existence koincidenčního kmitočtu, kde vzduchová neprůzvučnost významně klesá.

HLUK VYZAŘOVANÝ DO OKOLÍ

Akustický výkon v jednotlivých kmitočtových pásmech šířící se od hlavního zdroje ke konci potrubí je v závěru zmenšen o tzv. koncový odraz. V této kapitole se věnujeme vyzářování hluku přímo do venkovního prostoru. Ve venkovním prostoru v konkrétním kontrolním bodu se určí hluková situace jako výsledek logaritmického součtu dílčích hladin akustického tlaku opět od několika zdrojů hluku. Pomineme-li hluk pozadí, který může být vyvolán hlukem od vnějších zdrojů (např. automobilové dopravy apod.), tak v důsledku provozu spalovacího zařízení nebo VZT, je nutné počítat minimálně se zdroji hluku generovaných:

- ☐ z hrdla komínu,
- ☐ pláštěm komínu,
- ☐ z turbulentního proudu spalin ve volném prostoru.

HLUK VYZAŘOVANÝ Z KONCE POTRUBÍ

Aby bylo možné počítat s šířením hluku od tohoto zdroje, je nutno znát základní údaje, mezi které patří vzdálenost kontrolního bodu r [m], směrový činitel Q [-] a případné dodatečné útlumy D [dB], např. v důsledku ohybu zvuku. Hladina akustického tlaku v kontrolním místě L_{pi} [dB] se stanoví ze vztahu

$$L_{pi} = L_{whi} + 10 \log \frac{Q}{4\pi r^2} + D \quad (6)$$

kde je:

L_{whi} hladina akustického výkonu na konci komínu v příslušném kmitočtovém pásmu [dB],

Q směrový činitel [-],

D dodatečné útlumy v atmosféře [dB].

SMĚROVÝ ČINITEL Q

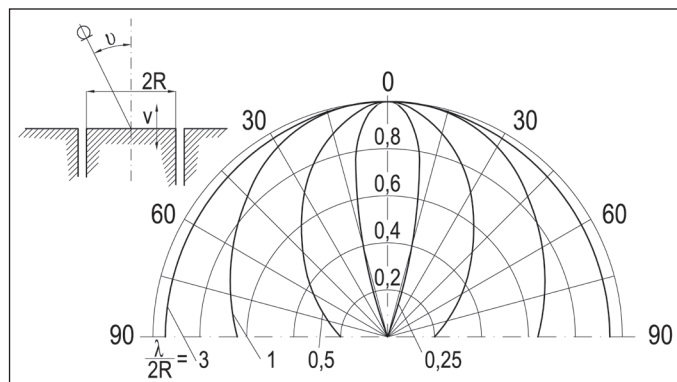
Ve venkovním prostoru, do kterého je z hrdla komínu (potrubí) vyzařován akustický výkon o určitém kmitočtovém složení, je možné pozorovat nerovnoměrné směrové vyzařování. Určité informace o směrovém vyzařování zdrojů hluku lze čerpat z teorie o základních teoretických zářících n -tého řádu (nultého, 1. a 2. řádu).

Pokud bychom modelovali vyzařování z otvoru s kmitajícím pístem, získali bychom kmitočtově závislé směrové charakteristiky, jak ukazuje schéma na obr. 7.

Úhel θ představuje úhel polohy (umístění) mikrofonu při měření. Rozměr zdroje je definován jeho poloměrem R [m] a v [m/s] představuje rychlost kmitání v ústí potrubí, což je hodnota odlišná od výtokové rychlosti.

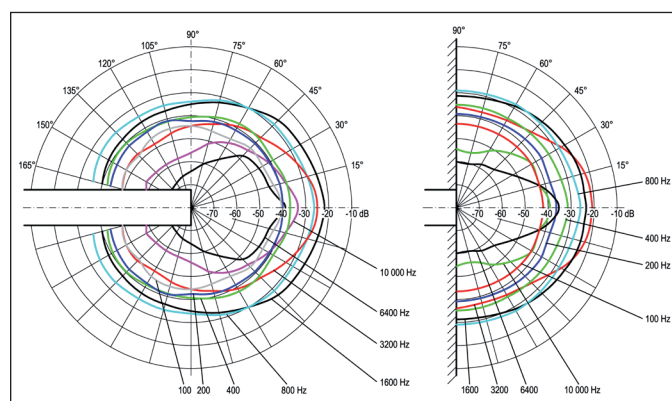
Z uvedených informací vyplývá velká složitost a požadavek na teoretické zvládnutí problémů generace hluku ze zdrojů podobných potrubních zakončení. Pro praxi se nabízí proto aplikace poznatků, získaných na základě experimentálně zjištěných dat. Je ale třeba respektovat skutečnost, že se jedná o výrazně směrově závislé vyzařování akustické energie. Z uvedených informací je třeba zdůraznit významnou závislost směrového vyzařování na velikosti průměru komínu d [m] a současně na kmitočtu akustického signálu f [Hz], resp. jeho vlnové délce λ [m].

V technické literatuře můžeme nalézt informace o akustických polích, která jsou vyvolána vyzařováním akustické energie do volného prostoru ze zakončení potrubního systému. Jedním příkladem může být diagram na obr. 8. Z tohoto diagramu je patrné, že tvar křivek se pro nižší kmitočty blíží tvaru koule, kdežto pro kmitočty vyšší jde spíše o protáhlý tvar ve



Obr. 7 Směrové vyzařování hluku z otvoru o průměru $2R$ – teoretické řešení [9]

Fig. 7 Directional noise radiation from a hole of diameter $2R$ – theoretical solution [9]



Obr. 8 Směrové vyzařování z konce potrubí do volného prostoru, resp. poloprostoru [9]

Fig. 8 Directional radiation from the pipeline terminated to the free space and half-space [9]

směru osy potrubí. Z toho je možné vyvozovat, že signály v oblasti nižších kmitočtů se budou chovat jako zdroj nultého řádu, kdežto signály na vyšších kmitočtech jako zdroj 1. řádu. V praxi jsou do potrubí (kouřovodu) instalovány absorpční tlumiče hluku, které svým kmitočtovým průběhem útlumu dobře pohlíží střední a vyšší kmitočty, kdežto nižší kmitočty projdou dále do potrubí. Z toho důvodu jsou pak na konci potrubí významné zejména nižší kmitočty, které – jak již bylo řečeno – je možno kvalifikovat směrovým činitelem $Q = 1$.

Autoři se většinou nezabývají vlivem proudění vzdušiny do volného prostoru ve vztahu k celkovému vyzařování akustické energie. V případě výtoku vzduchu z potrubí do volného prostoru vyššími rychlostmi jsou známy případy, kdy o celkovém generovaném akustickém výkonu rozhoduje aerodynamický hluk. Příkladem jsou obecně známé informace o rychlostních polích při výtoku vzduchu z otvoru jak při izotermickém, tak i neizotermickém proudění.

AERODYNAMICKÝ HLUK VOLNÉHO PROUDU

Je zřejmé, že hlavním parametrem vyzařování aerodynamického hluku při výtoku plynu z potrubí do volného prostoru je rychlost proudění vzduchu nebo spalín, resp. Machovo podobnostní číslo určující poměr mezi skutečnou rychlostí proudění vzduchu a rychlostí zvuku, jak vyjadřuje následující vztah

$$Ma = \frac{w}{a} \quad (7)$$

kde je:

w rychlost proudění [m/s],

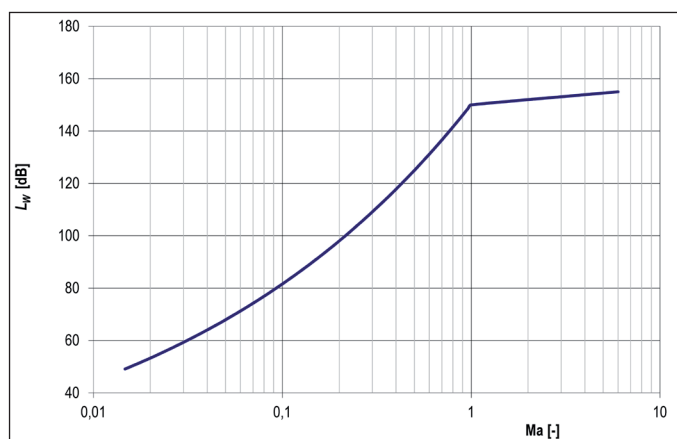
a rychlost zvuku uvnitř potrubí, závislá na teplotě plynu [m/s].

Rychlost zvuku označená a představuje hodnotu uvnitř potrubí při dané teplotě vzduchu a odlišuje se od hodnoty rychlosti zvuku okolního prostředí c . Rychlost zvuku je závislá na teplotě, pro teplotu např. $t = 20$ °C je rychlost zvuku 343 m/s, pro 50 °C je 360 m/s a pro 100 °C je 387 m/s.

Celkový vyzařovaný akustický výkon W [W] zatopeného proudy je závislý na určité mocnině rychlosti proudění

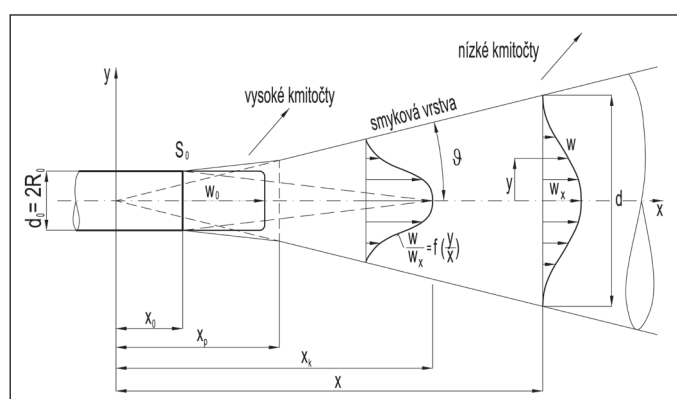
$$W \approx w^n \quad (8)$$

Exponent n [-] se mění od hodnoty cca 4 pro případ velmi nízkých rychlostí proudění až po hodnotu $n = 8$ pro případ čísla $Ma = 1$. Pokud by



Obr. 9 Závislost generovaného akustického výkonu na Ma čísle

Fig. 9 Dependence of generated acoustic power on the Ma number



Obr. 10 Rychlostní schéma zatopeného proudu vzduchu [9]

Fig. 10 Speed diagram of submerged air jet [9]

se jednalo o nadzvukové proudění vzduchu z otevřeného konce potrubí, změnil by se exponent na hodnotu $n = 3$. Právě tuto závislost na n -té mocnině rychlosti představuje graf na obr. 9, který zobrazuje závislost celkové (jednočíselné) hladiny akustického výkonu na Machově čísle.

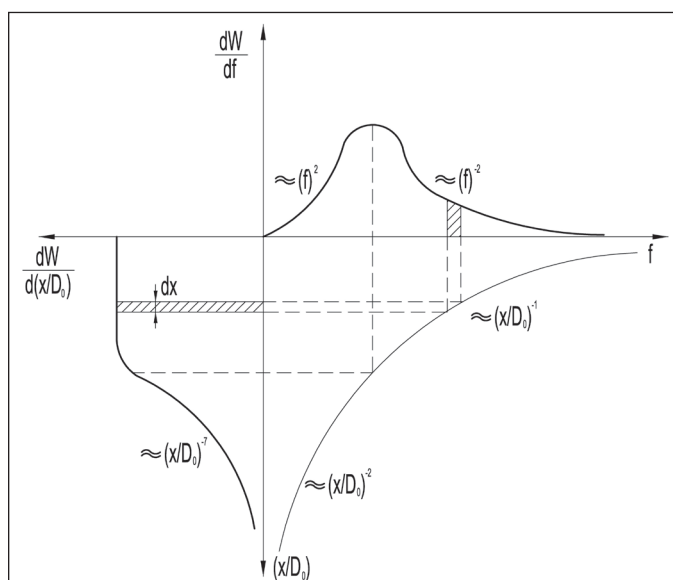
To však odpovídá až případu výtoku plynů z tlakových nádob, resp. spalín z leteckých proudových a raketových motorů.

S případem, kdy se rychlost výtoku blíží nebo dosahuje rychlosti zvuku, se může čtenář setkat při výtoku plynů z tlakových potrubních systémů. Ze znalosti termodynamiky je možné určit rychlost výtoku vzduchu v závislosti na tlakovém spádu.

Schematické vyjádření rychlostních poměrů ve volném prostoru v případě izotermního výtoku vzduchu z konce potrubí znázorňuje nákres na obr. 10.

V krajní oblasti, v tzv. jádru proudu, kterou můžeme vyjádřit nerovností délek $x \leq x_k$, je vyznačen prostor ve tvaru kužele, ve kterém se ještě rychlost rovná původní hodnotě výtoku rychlosti w_0 [m/s]. Veličina x_k určuje vzdálenost konce jádra proudu. Ve vzdálenějších bodech, v oblasti zcela vyvinutého turbulentního proudu, jsou již rychlosti proudění nižší a rychlostní profily jsou si přitom geometricky podobné.

Na rozhraní mezi oblastí klidného vzduchu a proudem vzduchu z výusti dochází ke vzniku vírů, které jsou schopny generovat aerodynamický hluk. V pásmu tzv. jádra proudu vznikají rozměrem malé víry, ale s velice intenzivní rotací. Z toho vyplývá vyzařování vysokofrekvenčních složek



Obr. 11 Spektrální složení vyzařovaného hluku ze zatopeného proudu [9]

Fig. 11 Spectral composition of noise emitted by submerged jet [9]

spektra hluku. Z oblasti zcela vyvinutého turbulentního proudu $x > x_k$, kde již rychlost proudění vzduchu postupně klesá, jsou generovány nízkofrekvenční složky zvuku.

Hluk vznikající vzájemným působením vzduchu vytékajícího z potrubí a vzduchu v okolním prostoru lze přirovnat k teoretickému případu tzv. zářiče 2. řádu (quadropolu). Generovaný hluk má směrovou charakteristiku maximální pro směr 45° od osy výtoku.

Pokud budeme sledovat podíl vyzařovaného hluku z jednotlivých dílčích úseků o šířce dx , zjistíme, že maximální výkon je vyzařován z oblasti jádra proudu, jehož délka x_k činí cca čtyř až pětinašobek průměru dýzy D_0 . Přitom se jedná o vysokofrekvenční složky akustické energie. Vzdálenější oblast se již podílí podstatně nižšími složkami z hlediska úrovně i kmitočtového složení, jak je dokumentováno diagramem na obr. 11. Veličina W [W] reprezentuje akustický výkon, f [Hz] kmitočet a x [m] souřadnici vzdálenosti od čela otvoru.

Za předpokladu, že se jedná o výtok z nádoby podle schématu na obr. 10 (izentropická expanze), je možné určit rychlost výtoku vzduchu, pro podkritické proudění vzduchu, podle vztahu (Saint Vénantova – Wantzelova rovnice):

$$w = \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{p_0}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]} \quad (9)$$

kde je:

- κ Poissonova konstanta pro vzduch $\kappa = 1,4$ [-],
- p_0 počáteční tlak v nádobě [Pa],
- ρ_0 hustota plynu v nádobě [kg/m³],
- p tlak ve volném prostoru [Pa].

Z rovnice vyplývá, že rychlost proudění w neroste neomezeně, neboť poměr tlaků je limitován. Při úplné expanzi plynu do vakua na absolutně nulový tlak by vyšla maximální rychlost proudění

$$w_{max} = \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{p_0}{\rho_0}} \quad (10)$$

Spektrální složení vyzařovaného hluku je vyjádřeno diagramem na obr. 11. Vyplývá z něho vyzařování vysokofrekvenčních složek z pásma jádra proudu. Naopak nízkofrekvenční složky hluku jsou vyzařovány z tzv. oblasti zcela vyvinutého turbulentního proudu.

Důležitým poznatkem je výrazné směrové vyzařování akustické energie, kdy pod úhlem $\vartheta = 45^\circ$ dosahuje směrový činitel Q [-] svého maxima. Vyzařování hluku z proudu vytékající vzdušiny můžeme přirovnat k teoretickému zářiči 2. řádu.

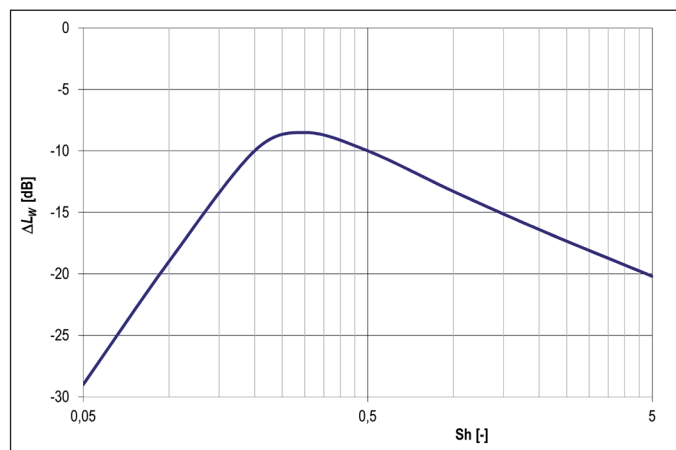
Jak z předpokladů Lighthilla [7], tak i z provedených experimentů vyplývá, že závislost akustického výkonu na 8. mocnině rychlosti proudění platí pouze pro vysoké hodnoty Machova čísla. Pro nižší hodnoty $Ma < 0,8$ se snižuje hodnota exponentu rychlosti, jak dokládá diagram na obr. 9. Pro vyjádření celkového akustického výkonu, který je vyzařován zatopeným proudem, můžeme použít vztah (11), kde je třeba upřesnit význam jednotlivých veličin. Např. za charakteristický rozměr sledovaného děje se dosazuje průměr potrubí. Rychlost proudění w_0 [m/s] bude odpovídat rychlosti v hrdle potrubí. Po těchto úpravách se získá již prakticky použitelný vztah pro výpočet akustického výkonu ve tvaru

$$W = K \rho_0 w_0^8 a^{-5} D_0^2 \quad (11)$$

kde je:

- D_0 průměr potrubí [m],
- w_0 rychlost výtoku plynu [m/s],
- K koeficient úměrnosti dosahuje hodnot $< 3,5 \cdot 10^{-5}$ až $7 \cdot 10^{-5}$ [-],
- a rychlost zvuku uvnitř potrubí, závislá na teplotě plynu [m/s].

Kdybychom za rychlost zvuku dosadili např. hodnotu při teplotě okolí např. 20°C a ve skutečnosti by teplota proudícího plynu byla např. 100°C , bude rozdíl ve výsledné hodnotě 2,5 dB, což je nezanedbatelný rozdíl. Vztah (11) dobře souhlasí s experimentálně zjištěnými údaji v oblasti Machova čísla blízkého se $Ma \rightarrow 1$. Při nízkých výtokových rychlostech cca do hodnoty 30 m/s však závislost na 8. mocnině rychlosti proudění v trysce neplatí. Z četných experimentálních prací vyplývá přibližně závislost na 6. mocnině výtokové rychlosti. Vztah (11) podává informaci o celkovém akustickém výkonu, který je vyzařován přes celé slyšitelné pásmo. Budou-li nás zajímat hladiny akustického výkonu např. v třetinooktávových pásmech, můžeme k výpočtu použít diagram na obr. 12, který hovoří o kmitočtovém rozložení vyzařovaného akustického výkonu na frekvenční ose. K tomuto vyjádření je použito bezrozměrné Strouhalovo číslo, které je definováno vzorcem



Obr. 12 Spektrální složení akustického výkonu trysky jako funkce podobnostního čísla Sh [9]

Fig. 12 Spectral composition of the nozzle acoustic power as a function of the dimensionless number Sh [9]

$$Sh = \frac{f \cdot D_0}{w_0} \quad (12)$$

kde je:

- D_0 charakteristický rozměr trysky [m],
- w_0 rychlost proudění tekutiny v trysce [m/s].

Nejprve je však třeba akustický výkon stanovený podle vztahu (11) převést do logaritmické stupnice podle obecného vztahu

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (13)$$

kde W_0 je referenční hodnota akustického výkonu 10^{-12} W.

Hladina akustického výkonu v třetinooktávovém pásmu $L_{w1/3}$ se stanoví ze vzorce

$$L_{w1/3} = L_w + \Delta L_w \quad (14)$$

kde je:

- L_w celková hladina akustického výkonu [dB],
- ΔL_w korekce na kmitočtové rozložení podle diagramu na obr. 12, pro hodnoty Strouhalova čísla odpovídající frekvencím dle třetinooktávového spektra [dB].

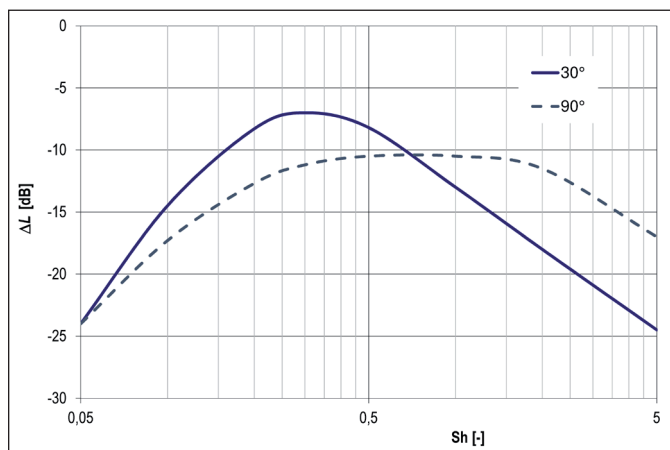
Komplexní pohled na rozložení vyzařovaného akustického výkonu na kmitočtové ose i podél osy x proudem tekutiny podává diagram na obr. 11.

Spektrální hustota vyzařovaného akustického výkonu má svoje maximum, které odpovídá přibližně vyzařování z konce jádra proudu ($x/D = 4$ až 5). Rozložení vyzařovaného akustického výkonu podél osy x popisuje levá část diagramu. Je zřejmé, že maximum akustické energie je generováno v oblasti jádra proudu. Ve větších vzdálenostech prudce klesá vyzařovaný akustický výkon a jeho kmitočet se navíc výrazně snižuje.

Hluk vyzařovaný z proudu tekutiny je silně směrově závislý. Maximální akustický výkon je vyzařován přibližně pod úhlem 45° .

Směrové závislosti nejsou stejné pro všechny kmitočty. Kmitočtové složení zvuku bylo vyšetřováno ve dvou základních oblastech, které lze charakterizovat směrem v rozsahů úhlů $20^\circ < \vartheta < 60^\circ$ a $70^\circ < \vartheta < 180^\circ$.

Na obr. 13 je v diagramu uvedena oprava na kmitočtové složení akustického signálu pro dva úhly vyzařování, které přibližně reprezentují uvede-



Obr. 13 Relativní spektrum hladiny akustického tlaku pro dva směry vyzařování [9]

Fig. 13 Relative spectrum of sound pressure level for two directions of radiation [9]

né dvě oblasti. Hladina akustického tlaku L_p pro třetinoctávové pásmo v určité vzdálenosti r a směru ϑ se určí podle vztahu:

$$L_{p1/3} = L_W + 10 \log \frac{1}{4\pi r^2} + \Delta L + \Delta L_W \quad (15)$$

kde je:

- L_W celková hladina akustického výkonu podle vztahu (11) [dB],
- ΔL korekce na směr vyzařování podle diagramu na obr. 13 [dB],
- ΔL_W korekce na kmitočtové složení zvuku podle diagramu na obr. 12 [dB].

Uvedený postup je možné aplikovat pro rozsah Machových čísel $0,5 < Ma < 1$. Ve vztahu (15) je směrový činitel nahrazen číslem 1, což platí pro ústí komínu vysoko nad terénem. Pro ústí potrubí na fasádě objektu by hodnota směrového činitele byla 2, nebo 4 – pokud by bylo ústí v blízkosti přilehlé země (blízkost dvou ploch).

Pro malé rychlosti výtoku tekutiny z trysky ($Ma < 0,12$) platí poněkud jiné závislosti. Celková hladina akustického výkonu se pak určí ze vzorce:

$$W = K \rho_0 w_0^4 a^{-1} D_0^2 \quad (16)$$

kde je $K \cong 10^{-7}$. Význam ostatních veličin je analogický se vztahem (11).

Musíme však poznamenat, že při hodnocení účinků hluku na člověka není celková hladina akustického tlaku tím správným parametrem. Je obecně známo, že vnímání zvuků člověkem je závislé na kmitočtu daného akustického signálu. V praxi, v nařízení vlády č. 272/2011 Sb. [8], je tato skutečnost zohledněna hladinou akustického tlaku $A L_{pA}$ [dB], určenou ze spektra hladiny akustického tlaku, pro kterou platí:

$$L_{pA} = 10 \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{0,1(L_{pi} + K_{Ai})} \right) \quad (17)$$

kde K_{Ai} vyjadřuje citlivost zdravého lidského sluchového orgánu [-].

Hladina akustického tlaku L_{pi} ve vztahu (17) představuje jednotlivé hodnoty hladin akustického tlaku v oktavovém nebo třetinoctávovém pásmu.

Z uvedeného vyplývá, že je nezbytné řešit šíření hluku od zdrojů v závislosti na kmitočtovém složení daného kontrolovaného akustického signálu.

Celkové hodnocení hluku musí vycházet z respektování všech možných dílčích zdrojů hluku.

V první řadě musí být bráno do úvahy spektrum hluku, které je vyzařováno např. spalovacím zařízením, pokud se jedná o generaci hluku z komínů. V případě vzduchotechnických zařízení nutno znát akustický výkon vznikající v daném potrubním systému vlivem hluku ventilátoru a dílčích aerodynamických zdrojů, jako jsou elementy potrubí (ohyby, difuzory, konfuzory, mřížky, klapky apod.)

Z konce potrubí (komínu) je vyzařován hluk vlivem uvedených dílčích zdrojů, ke kterému se přičítá hluk vznikající výtokem plynů shora uvedeným způsobem. Je zřejmé, že generace hluku z komínů je poněkud komplikovaná, neboť v konkrétním případě je nezbytné počítat nejenom s generací hluku určitými elementy v potrubním systému, ale také s přirozenými útlumy hluku v různých částech potrubního systému. Navíc je k tomu nutno připočítat hluk vznikající v důsledku turbulentního výtoku vzduchu do volného prostoru.

Vše je nutné řešit v závislosti na kmitočtovém složení daného akustického signálu. V naprosté většině případů je nutné sledovat vznik a šíření hluku minimálně v oktavových kmitočtových pásmech (31,5 Hz až 8 kHz). V dnešní době, kdy jsou projektanti vybaveni přístrojovou technikou pro měření hluku, která je schopna udávat hladiny akustického tlaku v třetinoctávových pásmech, je třeba preferovat výpočet od třetinoctávy, tj. od 25 Hz do 10 kHz.

Význam ve sledování třetinoctávového pásma spočívá také v identifikaci tónových složek ve spektru zvuku zdroje. Podle již zmíněného nařízení vlády [8] je tónová složka identifikována ve spektru, jestliže je hladina akustického tlaku ve třetinoctávovém pásmu, případně i ve dvou sousedních třetinoctávách vyšší o více než 5 dB než sousední třetinoctávy a v pásmu od 10 do 160 Hz je ekvivalentní hladina akustického tlaku vyšší než hodnota prahu slyšení. Na obr. 14 je uveden příklad identifikace tónové složky. Příklad označený slovem NE není tónovou složkou, i když splňuje podmínku, že je tato hladina o více než 5 dB vyšší než sousední. Protože je tato hodnota v pásmu od 10 do 160 Hz, musí zde být současně splněna podmínka, že příslušná hladina akustického tlaku musí být vyšší než hodnota prahu slyšení, což splněno není. Nejde tedy o tónovou složku. Je jasné, že tónová složka ve spektru signálu zdroje bude negativním faktorem pro exponované osoby. A právě identifikace tónové složky vede podle [8] ke zpřísnění místně daného hygienického limitu o 5 dB. Bude-li např. v chráněném venkovním prostoru obytné stavby v noční době hygienický limit $L_{Aeq,1h} = 40$ dB, dojde vlivem identifikace tónové složky ve spektru k jeho zpřísnění na hodnotu 35 dB, do doby odstranění této tónové složky ze spektra zdroje hluku.

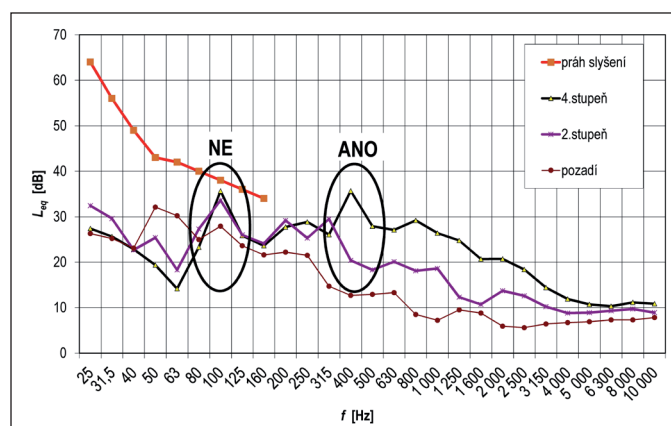
Pro podrobnější informace o dílčích aerodynamických zdrojích hluku v potrubních systémech včetně hluku ventilátorů autoři odkazují na dřívější publikace [1], [2], [5], [9].

Z teorie aerodynamického hluku jsou publikovány informace o různých případech těchto proudění a jejich vlivu na generaci aerodynamického hluku. Z praxe je známo, že nejnižší vyzařování hluku z potrubí do volného prostoru odpovídá případu, kdy je potrubí zakončeno dýzou, která potlačí intenzitu turbulence na možné minimum. Pro tento případ lze kvantifikovat akustický výkon (hladinu akustického výkonu A) vztahem, který byl získán na základě provedených experimentů.

$$L_{WA} = 63 \log w_0 + 13,4 \log S - 8,4 \quad (18)$$

kde S je plocha průřezu dýzy [m²].

ŠÍŘENÍ HLUKU OD PLÁŠTĚ POTRUBÍ



Obr. 14 Identifikace tónové složky ve spektru zvuku

Fig. 14 Identification of the tone component in the sound spectrum

Těleso komínu nebo přímé potrubí jsou z hlediska kvalifikace akustických zářičů lineární zdroje, od kterých hladina akustického tlaku klesá pouze o 3 dB při zdvojnásobení vzdálenosti kontrolního místa. Teprve od vzdálenosti $r \geq 2l$ je možno počítat s poklesem hladiny akustického tlaku jako v případě bodového zdroje.

U lineárního zdroje hluku lze počítat šíření hluku podle vztahu

$$L_{pi} = L_{wri} + 10 \cdot \log \left(\arctg \frac{l}{r} \right) - 10 \log(4\pi l r) \quad (19)$$

kde je:

l délka potrubí, nebo vytčeného úseku [m],
 r vzdálenost od potrubí [m].

Podrobnější informace nalezne čtenář v lit. [3] a [6].

ZÁVĚR

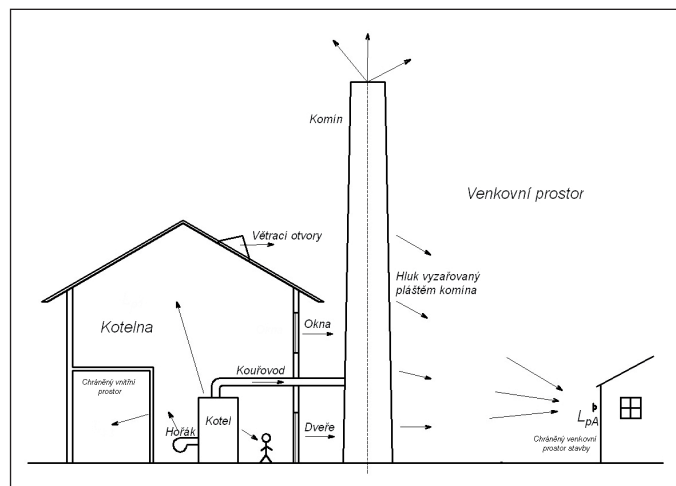
Při návrhu komínů a potrubních systémů zajišťujících odvod použitého vzduchu do venkovního prostoru je třeba kontrolovat, zda hluk ve venkovním prostředí nemůže být významným způsobem ovlivněn právě touto částí zařízení.

Je třeba nejprve kontrolovat generaci hluku ze spalovacího zařízení do kouřovodu, resp. ze vzduchotechnického zařízení do odváděcího potrubí. Souvisí s tím kontrola jak přirozených útlumů hluku v dílčích elementech potrubního systému, tak vznik aerodynamického hluku v těchto místech.

U potrubních systémů mohou vznikat tzv. vlastní útlumy hluku, o nichž byla již v minulosti podána řada informací. Mezi poslední útlumový efekt patří náhlé zakončení potrubí, které vyvolává poslední možný přirozený útlum hluku před jeho generací do venkovního prostoru.

Zná-li projektant hluk generovaný do venkovního prostoru přímo z potrubí, musí přistoupit i ke kontrole vlivu směrových charakteristik. Samostatnou kapitolou jsou směrové charakteristiky vyzařování hluku z konce potrubního systému bez vlivu proudění vzduchu. K tomuto efektu je třeba připočítat aerodynamický hluk vznikající třením vytékající vzdušiny s relativně klidným vzduchovým prostředím ve venkovním prostoru.

V článku prezentované informace byly získány za předpokladu, že ko-



Obr. 15 Cesty šíření zvuku

Fig. 15 Sound propagation paths

nec potrubí je bez jakýchkoliv překážek, jako jsou např. mřížky, stříšky nebo klapky na konci potrubí. V takovém případě se obvykle hluková situace zhoršuje, neboť na jejich místě vzniká další dílčí aerodynamický hluk a současně se nepříznivě ovlivňuje směrová charakteristika vyzařování hluku.

Projektant vždy musí řešit hlukovou situaci jako vliv celé řady zdrojů hluku působících v kontrolním místě (obr. 15) a stanovit jejich celkové působení. V jednotlivých částech tohoto příspěvku byly prezentovány možnosti výpočtů dílčích zdrojů, tedy stanovení spektra hladin akustických výkonů, které projektant přepočítá na spektra hladin akustického tlaku v kontrolním místě podle obecně známých vztahů pro šíření zvuku ve volném a uzavřeném prostoru. S využitím vztahu pro logaritmický součet pak stanoví jejich celkové působení v kontrolním místě. Logaritmický součet je dán vztahem

$$L_{pci} = 10 \cdot \log \sum_{i=1}^n \left(10^{0.1 L_{pi}} \right) \quad (20)$$

Výsledkem je opět spektrum, které je možno podle vztahu (17) přepočítat na jednočíslnou hladinu akustického tlaku A , a tu pak následně srovnat s hygienickým limitem daným nařízením vlády.

Kontakt na autory: Richard.Novy@fs.cvut.cz; Miroslav.Kucera@fs.cvut.cz

Použité zdroje:

- [1] KRÁLÍČEK, J., KUČERA, M. Aerodynamický hluk lopatkové mříže. *Vytápění, větrání, instalace*. 2015, ročník 24, číslo 3, s. 118–123. ISSN 1210-1389.
- [2] KRÁLÍČEK, J., KUČERA, M. Aerodynamic Noise of Blade Grill HVAC Systems at Low Mach Number. In: *Proceedings of the 24th International Congress on Sound and Vibration*. London: The International Institute of Acoustics and Vibration, 2017. ISBN 978-1-906913-27-4.
- [3] KUČERA, M., NOVÝ, R., BAŠTA, J. Linear Sources with Non-linear Distribution of Sound Energy. In: *Proceedings of the Fourteenth International Congress on Sound and Vibration*. Cairns: The International Institute of Acoustics and Vibration, 2007. ISBN 978-0-7334-2516-5.
- [4] KUČERA, M., NOVÝ, R. Akustické vlastnosti kruhových klapek. *Vytápění, větrání, instalace*. 2011, ročník 20, číslo 5, s. 202–206. ISSN 1210-1389.
- [5] KUČERA, M. Hluk malých otvorů a štěrbin. *Vytápění, větrání, instalace*. 2011, ročník 20, číslo 4a, s. 143–150. ISSN 1210-1389.
- [6] KUČERA, M. Hluková hlediska při provozu spalovacích zařízení 3. díl Kouřovody a komíny. *Topenářství instalace*. 2013, ročník 47, číslo 1, s. 36–38. ISSN 1211-0906.
- [7] LIGHTHILL, M. I. On Sound Generated Aerodynamically, Part I, General Theory. *Proceedings of the Royal Society*, sev. Vol. A. 211, No. 1107, 1952, pp. 564–578.
- [8] Nařízení vlády č. 272/2011 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací, ve znění novely č. 217/2016 Sb.
- [9] NOVÝ, R. *Hluk a chvění*. Praha: Ediční středisko ČVUT, 2000. 389 s. ISBN 80-02246-3.
- [10] NOVÝ, R., KUČERA, M. Hluk v otopných soustavách. In *18. konference Třeboň 2005*. Třeboň: 2005, s. 79–84. ISBN 80-02-01724-2.
- [11] NOVÝ, R., KUČERA, M., HRUŠKA, A. *Hluk strojovny VZT* [Autorizovaný software]. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav techniky prostředí. Praha. 2010.
- [12] MERHAUT, J. *Teorie elektroakustických přístrojů*. ČSAV Praha 1955.
- [13] REINICKE, W., DANNER, J. *Schallabstrahlung von Schornsteinen – Messung und technische Möglichkeiten zu ihrer Minderung*. Berlin: Umweltbundesamt. 1981. s. 52.
- [14] REYNOLDS, D. D., BLEDSOE, J. M. *Algorithms for HVAC Acoustics*. Atlanta, Georgia: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning, 1991. ISBN 0-910110-75-1.