

Ing. Jan KRÁLÍČEK
Ing. Miroslav KUČERA, Ph.D.
ČVUT Praha, Fakulta strojní,
Ústav techniky prostředí

Aerodynamický hluk lopatkové mříže

Aerodynamic Noise of Blade Grill

Recenzent
Ing. Zdeněk Jandák, CSc.

Článek pojednává o aerodynamickém hluku vznikajícím při nízkých hodnotách Machova, resp. Reynoldsova čísla proudění vzduchu přes lopatkovou mříž běžně používanou jako koncová vyústka VZT rozvodů. Experiment byl prováděn pro pět úhlů natočení lopatek a pro dva směry proudění vzduchu. Vyhodnocení hladin akustického výkonu bylo provedeno na základě měření hladin akustického tlaku v polodrazivém prostředí v poli přímých vln zdroje hluku.

Klíčová slova: hluk, prostředí, vzduchotechnika

The paper deals with aerodynamic noise which is generated at low Mach numbers, respective low Reynolds numbers, by air flowing over a blade grill commonly used as a terminal diffuser of air-distributing systems. The experiment was performed for five angles of blade rotation and two directions of air flow. The evaluation of the sound power levels was performed on the basis of sound pressure levels measurement in the semi-reflective environment in the field of direct waves from the source of sound.

Keywords: noise, environment, ventilation systems

ÚVOD

Aerodynamický hluk je vyvolaný turbulentním prouděním. K jeho nadměrnému vyzařování může dojít například při nesprávném návrhu koncových elementů. Jedná se zejména o nedodržení rychlosti proudění vzduchu na koncových elementech, nebo nevhodný tvar či natočení lopatek. Aerodynamický hluk elementů potrubní sítě je tzv. vlastní hluk elementů. V potrubní síti VZT je obvykle dominantním zdrojem hluku ventilátor. Hluk od ventilátoru lze zatlučit vhodnou instalací tlumičů hluku. V systémech VZT se uplatňují zejména absorpční tlumiče hluku.

V akusticky náročných prostorech, jako jsou např. nahrávací rozhlasová či televizní studia, operační sály apod., je nezbytnou nutností dodržení nízkých rychlostí proudění vzduchu vzduchovody a zvláště pak koncovými elementy, kde tyto zdroje generují akustický výkon, který pak může být v přijímacím prostoru dominantním zdrojem. Všechny technické úpravy řešení útlumu hluku ventilátoru a rozvodů jsou tak v podstatě zbytečné, jelikož nadměrný hluk od koncových elementů může celé technické řešení zkazit, a je třeba hledat způsoby jak distribuční element upravit, znovu naprojektovat, případně bez náhrady odstranit.

Aerodynamický hluk byl v minulosti zkoumán mnoha autory, ovšem zejména v oblasti proudových motorů v rámci rozvoje letecké dopravy, např. výtok vzdušiny z trysky při vysokých Machových čísel zkoumal A. Franke [1]. V této oblasti bylo sepsáno množství publikací. Problematika aerodynamického hluku v oblasti nízkých či extrémně nízkých Machových čísel není v současné době tolik prozkoumána. Základy aerodynamického hluku vytvořil autor Lighthill [3]. Jeho teorie je využívána při popisu turbulentního proudu a generace hluku v turbulentní mezní vrstvě.

Podle [5] lze rozlišit dva základní případy generace zvuku: volná turbulence vznikající při výtoku tekutiny z otvoru a zvuk od turbulence při obtékání povrchu tělesa. Teorie dále uvádí, že výtok tekutiny z otvoru, tzv. zatopený proud (vzduch proudící z vyústky), lze přiřadit k teoretickému akustickému zářiči druhého řádu kvadrupólu. Závislost akustického výkonu na střední rychlosti proudění je pro oblast nízkých Machových čísel pod 0,12 v úrovni 4. mocniny. Pro Machova čísla 0,12 až 0,6 je tato závislost s 6. mocninou rychlosti. V oblasti jádra proudu je vyzařován vysokofrekvenční hluk, v oblasti zatopeného proudu je vyzařován nízkofrekvenční hluk. Vzhledem k tomu, že je proud te-

kutiny přiřazován ke kvadrupólu, je vyzařování hluku výrazně směrově závislé. Svá maxima hluku volný proud tekutiny z otvoru vyzařuje pod úhlem 45° od osy vyústky.

Obtékání těles proudem tekutiny (případ lopatkové mříže umístěné v proudu vzduchu) je přiřazováno k teoretickému zdroji 1. řádu nazývanému dipól. Závislost akustického výkonu na střední rychlosti proudění vzduchu je dle teorie s 6. mocninou. Ve spektru hluku při obtékání těles mohou vznikat tónové složky, tzv. Strouhalovy tóny, které způsobují pravidelné úplavy (odtrhávání vírů) vzniklé za tělesem – Karmánova vírová stezka. Pokud je válec obtékán tekutinou, tak se při $Re > 1000$, vytváří tyto Strouhalovy tóny při konstantním $Sh = 0,21$ [5].

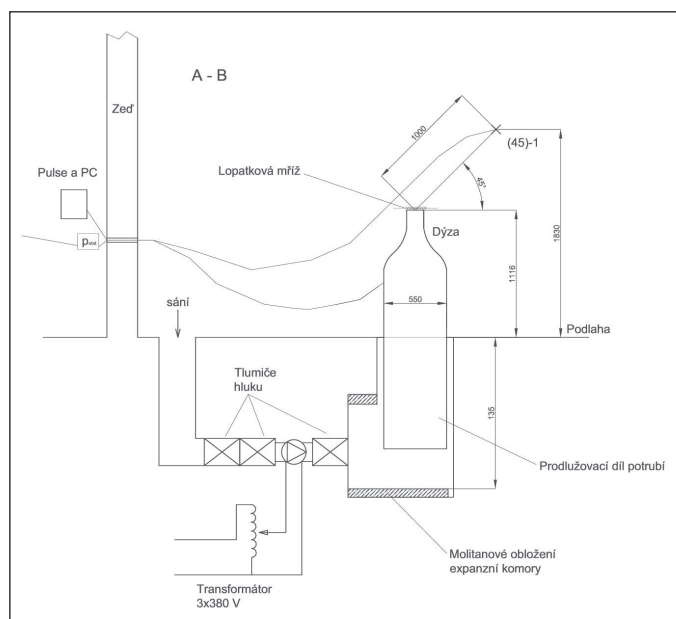
Provedení experimentů aerodynamického hluku od lopatkové mříže lze řešit dvojím způsobem. Do uzavřeného potrubí je vložena lopatková mříž a výsledné měření hluku zahrnuje i vliv stěn, např. měření hluku vzduchotechnických klapek, jejichž regulační list představuje lopatku obtékanou proudem vzduchu [3]. Výsledky této práce potvrzují očekávanou závislost akustického výkonu na rychlosti proudění vzduchu na 5. až 6. mocniny.

Druhou možností je provedení měření s lopatkovou mříží umístěnou nad vytékajícím volným proudem tekutiny tak, aby proud zasahoval pouze lopatkovou mříž. Tento druhý způsob byl proveden v práci Putty [6], kde byly prováděny experimenty na lopatce obdélníkového profilu pro různé tloušťky lopatky samostatně vložené v proudu vzduchu a dále při sériovém řazení dvou lopatek. Putta potvrdil teoretické poznatky [5] z maximálního vyzařování hluku ve spektru při $Sh = 0,2$ [6].

Výsledky prezentované v tomto článku jsou pokračováním, resp. rozšířením experimentu provedeného v literatuře [2]. Cílem této práce bylo stanovit akustické vlastnosti lopatkové mříže – koncové vyústky pro přívod vzduchu, pro různé úhly natočení lopatek a pro zvolený rozsah rychlosti proudění vzduchu.

EXPERIMENTÁLNÍ TRAŤ

Měření bylo realizováno v akustické laboratoři ústavu techniky prostředí, kde podlahu tvoří hladký beton, stěny jsou obloženy zvukopohltivým materiálem Polyson. Schéma experimentální tratě je prezentováno na obr. 1.



Obr. 1 Schéma experimentální tratě

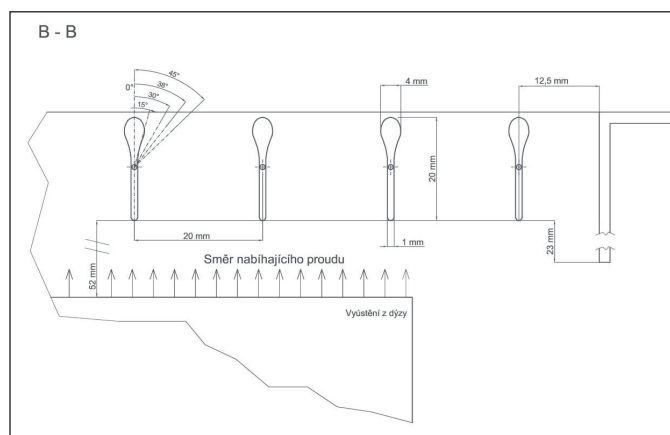
Zdrojem tlakového vzduchu experimentální tratě je radiální ventilátor umístěný v kanále pod podlahou laboratoře. Plynulá změna otáček ventilátoru je řízena frekvenčním měničem. Sání ventilátoru je otvory v podlaze zatlučenými buňkovými tlumiči hluku. Výdech ventilátoru je veden v kanále s buňkovými tlumiči hluku do expanzní komory pod podlahou, na níž je nasazena Vítošinského dýza, jejímž účelem je zajistit rovnoměrné natékání vzduchu na lopatkovou mříž s minimální turbulencí proudu. Ústí dýzy má průměr 150 mm, toto ústí je 1,2 m nad podlahou.

Rychlost proudění vzduchu byla nastavována na základě měření statického přetlaku ve válcové části dýzy (průměr 550 mm) před zúžením a experimentálně zjištěné tunelové konstanty $X' = 1,085$ (poměr dynamického tlaku v úrovni ústí dýzy a statického přetlaku ve válcové části dýzy před zúžením). Měření probíhalo v rozsahu rychlostí 4 až 18 m/s. Dolní mez byla definována z důvodu odstranění vlivu hluku pozadí, horní mez pak možnostmi experimentální tratě.

Nad ústím dýzy byla umístěna lopatková mříž ve vzdálenosti 52 mm od okraje ústí dýzy, viz obr. 2. Tato vzdálenost byla zvolena s ohledem na dva faktory:

- ❑ Nejmenší ovlivnění statického přetlaku ve válcové části dýzy před zúžením vlivem vzniklé tlakové ztráty přítomností lopatkové mříže v proudu vzduchu – navýšení stat. přetlaku při 0° je do 1,7 %, při 45° do 9 %.
- ❑ Volný proud vycházející z ústí dýzy při této vzdálenosti nezasahoval do bočních stěn lopatkové mříže.

Měření lopatkové mříže bylo realizováno pro úhly natočení lopatek 0, 15, 30, 38 a 45° měřeno od vertikální polohy a dva směry proudění vzduchu přes lopatkovou mříž představující sací a výdechovou vyústku. Sací vyústka (označena D) realizována tak, že proud nabíhá na zaoblenou stranu lopatky a výdechová vyústka (označena H), že proud nabíhá na tenčí („ostřejší“) konec lopatek. Na obr. 2 je detailní řez lopatkovou mříží v poloze lopatek pro výdech ozn. H. Pro směr opačný, v uspořádání jako sací vyústka, byly lopatky v rámu otočeny o 180°. Při větším natočení lopatek od svislé polohy (od 30°) byla subjektivně vnímána větší hlučnost a dále vyzařování tónové složky ve spektru hluku zejména u vyšších rychlostí. Z tohoto důvodu provedené měření hluku mapuje detailněji hluk od lopatek při větších úhlech natočení. Mezi polohy 30° a 45° byl zařazen doplňující bod 38° (37,5° zaokrouhleno).



Obr. 2 Poloha lopatek ozn. H – výdechová vyústka

Lopalková mříž byla obdélníkového tvaru 200 x 500 mm. V lopatkové mříži bylo umístěno celkem 10 lopatek osově vzdálených 20 mm. Výška lopatky je 20 mm, tloušťka úzké části 1 mm, širší část lopatky 4 mm, lopatka má kapkovitý tvar, viz obr. 2. Jako charakteristický rozměr pro dosazení do vztahu pro výpočet Sh byl zvolen rozměr širší části lopatky 4 mm.

METODIKA MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ

Měřena byla hladina akustického tlaku v 8 bodech osově symetricky rozmístěných kolem lopatkové mříže ve vzdálenosti 1 m pod úhlem 45°, viz schéma na obr. 3, jak uvádí např. lit. [5], je v poloze dané úhlem 45° možno očekávat maximální vyzařování hluku. Z těchto bodů byla vždy vypočítána průměrná hladina akustického tlaku pro všechny sledované j -té třetinoktávové kmitočty

$$\bar{L}_{pj} = 10 \log \frac{1}{n} \sum 10^{0,1 L_{pi}} \quad (1)$$

kde je:

L_{pi} měřená hladina akustického tlaku pro i -tou polohu mikrofonu [dB],
 n počet měřících poloh - $n = 8$ [-].

Hladina akustického výkonu byla vypočtena na základě obecně známého vztahu pro pole přímých vln pro všechny sledované j -té třetinoktávové kmitočty

$$L_{Wj} = \bar{L}_{pj} + 10 \cdot \log(S_m) \quad (2)$$

kde je:

S_m měřicí kulová plocha o poloměru 1 m [m²].

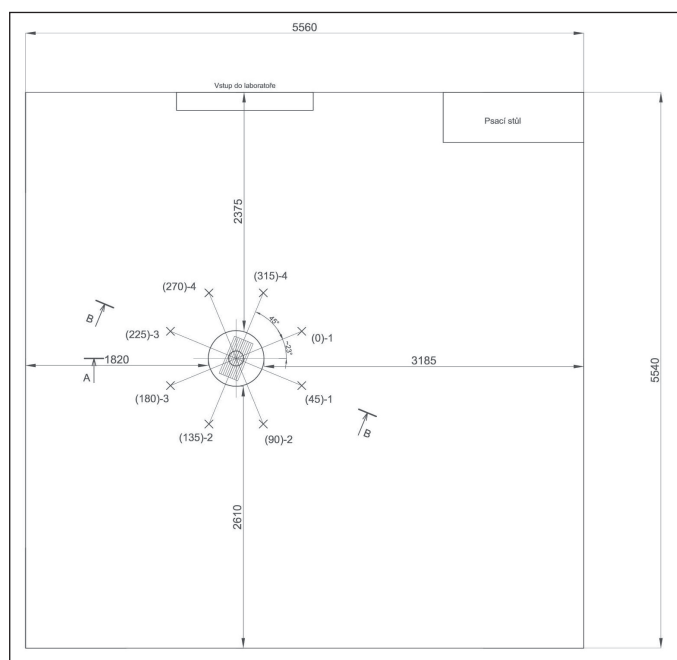
Výsledné hladiny akustického výkonu byly přepočítány na jmenovitou plochu vyústky 0,1 m² pro všechny sledované j -té třetinoktávové kmitočty dle vztahu

$$L_{Wj,0,1} = L_{Wj} + 10 \cdot \log\left(\frac{0,1}{S_{skut}}\right) \quad (3)$$

kde je:

S_{skut} plocha lopatkové mříže zasažené proudem vzduchu [m²].

Relativní hladiny akustického výkonu byly vypočítány pro všechny sledované j -té třetinoktávové kmitočty dle vztahu



Obr. 3 Půdorysné schéma rozmístění mikrofonů

$$L_{Wj,0,1,rel} = L_{Wj,0,1} - L_{W,0,1} \quad (4)$$

kde je:

$L_{Wj,0,1}$ celková hladina akustického výkonu vztažena na 0,1 m² plochy lopatkové mříže (logaritmický součet j -tých třetinoctávových hladin akustického výkonu) [dB].

Výpočtu hladin akustického výkonu v poli přímých vln zdroje zvuku bylo použito, jelikož při srovnání hladin akustického výkonu stanovených v poli přímých vln (v našem případě 1 m od středu dýzy) a v difuzním poli (v poli odražených vln) byl zjištěn rozdíl takto stanovených výkonů do 0,6 dB, při uvažování hladin akustického výkonu korigovaných váhovým filtrem A byl rozdíl do 2,8 dB, což lze uvažovat v rozsahu nejistoty měření a výpočtu.

Vyhodnocení měření bylo omezeno na rozsah kmitočtů od 80 do 12 500 Hz. V nízkých frekvencích je omezení kvůli možnému riziku ovlivnění měřeného spektra hlukem generovaným samotným ventilátorem. Hluk v nízkých kmitočtech je váhovým filtrem A výrazně korigován, jak plyne z kmitočtové charakteristiky tohoto filtru. Nízké frekvence jsou výrazně tlumeny, a tedy zde nebudou mít velký vliv na celkový výsledek.

Při porovnání naměřených hladin akustického tlaku od aerodynamického hluku samotné dýzy a dýzy s instalovanou lopatkovou mříží lze konstatovat, že hlukové spektrum aerodynamického hluku ovlivňuje lopatková mříž přibližně od 80 Hz výš. Ve vyšších třetinoctávových pásmech nad 12 500 Hz je aerodynamický hluk v tomto našem případě zanedbatelný.

Na výsledné naměřené spektrum hluku od dýzy s instalovanou lopatkovou mříží byla provedena korekce na hluk pozadí a korekce na dílčí hluk generovaný samotnou dýzou.

VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Naměřené výsledky jsou uváděny v grafické podobě pro obě polohy lopatek (dle směru proudu vzduchu) ve společných grafech.

RELATIVNÍ SPEKTRA HLADIN AKUSTICKÉHO VÝKONU

Naměřená a vypočtená relativní spektra hladin akustického výkonu jsou velice variabilní a jejich prezentace by byla značně rozsáhlá. Proto jsou zde uvedena pouze ta spektra, která se mění skokově, resp. při stejné rychlosti, úhlu natočení a rozdílné poloze lopatky si nejsou podobná.

Jedno mají relativní spektra hladin akustického výkonu společné, a sice extrémní vyzařování hluku při shodných Strouhalových číslech.

$$Sh = \frac{f \cdot l}{w_s} \quad (5)$$

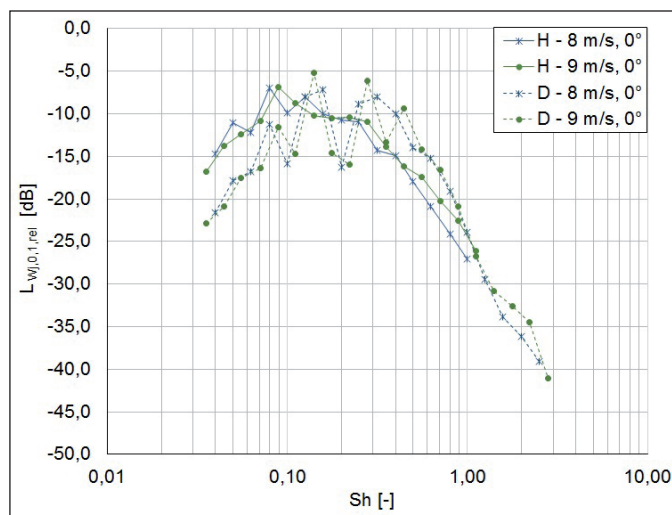
kde je:

f kmitočet [Hz],

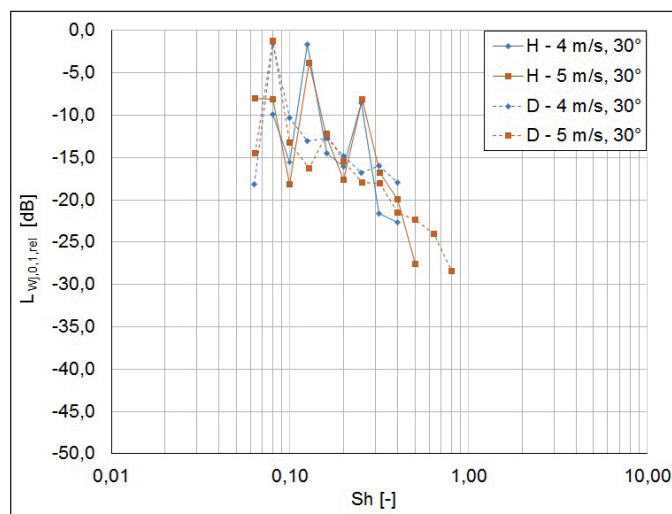
l charakteristický rozměr (tloušťka lopatky 4 mm) [m],

w_s střední rychlost proudu vzduchu podle průřezu [m/s].

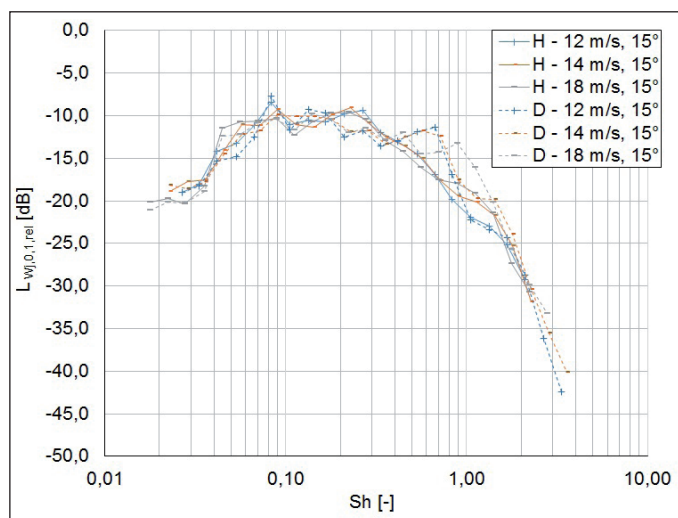
Dle pozorování naměřených relativních spekter bylo zjištěno, bez ohledu na polohu lopatky H či D, že extrémní relativních spekter jsou při přibližných hodnotách $Sh \sim 0,08$, $Sh \sim 0,15$ a $Sh \sim 0,25$. Tyto extrémní



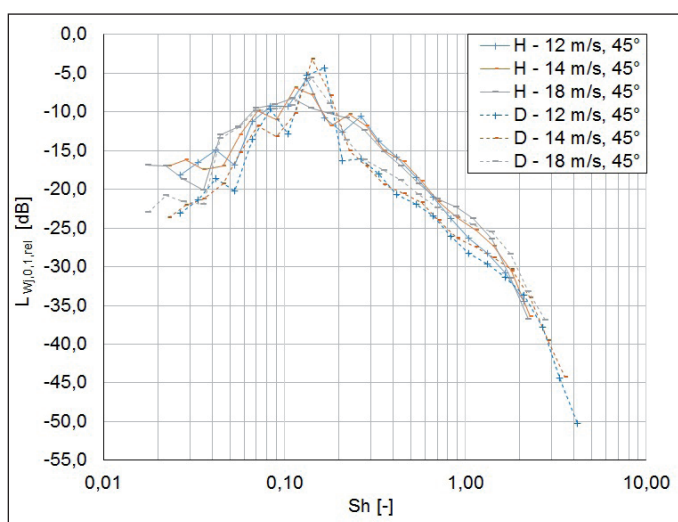
Obr. 4 Relativní spektra hladin akustického výkonu, H - výdechová vyústka (plná čára), D - sací vyústka (čárkovaná čára), natočení lopatek 0°, rychlosti 8 a 9 m/s



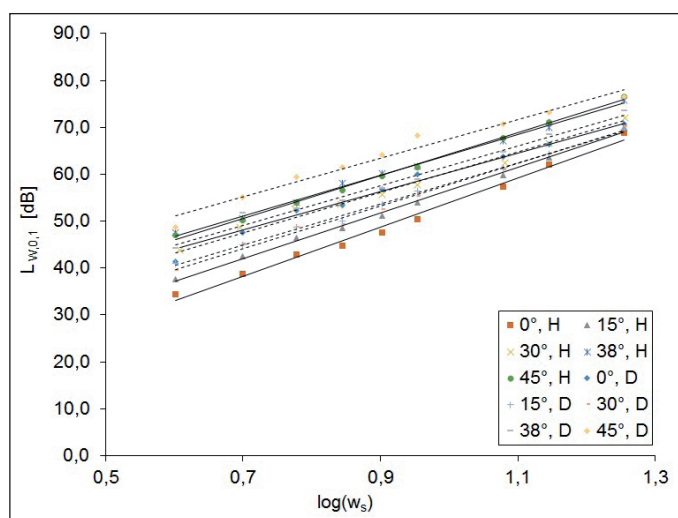
Obr. 5 Relativní spektra hladin akustického výkonu, H - výdechová vyústka (plná čára), D - sací vyústka (čárkovaná čára), natočení lopatek 30°, rychlosti 4 a 5 m/s



Obr. 6 Relativní spektra hladin akustického výkonu, H - výdechová vyústka (plná čára), D - sací vyústka (čárkovaná čára), natočení lopatek 15°, rychlosti 12, 14 a 18 m/s



Obr. 7 Relativní spektra hladin akustického výkonu, H - výdechová vyústka (plná čára), D - sací vyústka (čárkovaná čára), natočení lopatek 45°, rychlosti 12, 14 a 18 m/s



Obr. 8 Závislost celkové hladiny akustického výkonu na logaritmu střední rychlosti proudění vzduchu pro polohy lopatek H (regresní funkce plná čára) a D (regresní funkce čárkovaná čára), úhly natočení 0 až 45° a rychlosti 4 až 18 m/s

jsou s klesající rychlostí početnější a výraznější. Dominantní vyzařování hluku je při $Sh \sim 0,08$, bez ohledu na natočení lopatky, resp. na polohu lopatky H či D. Relativní spektra hluku při nízkých rychlostech jsou užší a jejich celková hlučnost je dána zmíněnými extrémy. Ukázkové zobrazení je na obr. 5 – relativní spektra hladin akustického výkonu při rychlosti 4 a 5 m/s. Tato spektra hluku jsou pro polohu lopatek H či D zároveň výrazně odlišná, stejně jako v případě spekter pro rychlosti 8 a 9 m/s na obr. 4.

Pokud je zvyšována rychlost proudění vzduchu (přibližně od 12 m/s výš) lopatkovou mříží, relativní spektrum hladiny akustického výkonu se rozšiřuje a extrémy jsou menší a jejich počet se snižuje na jeden. Při malém úhlu natočení lopatky do 30° není extrém téměř patrný, tvar spektra je zaoblený, viz ukázkové spektrum hluku na obr. 6. V případě většího natočení lopatky dochází k viditelnému extrému při $Sh \sim 0,15$, viz obr. 7. Tento dominantní extrém při $Sh \sim 0,15$ je patrný již od rychlosti 8 m/s a úhlu od 30°.

ZÁVISLOST CELKOVÉ HLADINY AKUSTICKÉHO VÝKONU NA RYCHLOSTI

Z naměřených výsledků byla stanovena funkční závislost celkové hladiny akustického výkonu na logaritmu střední rychlosti proudění

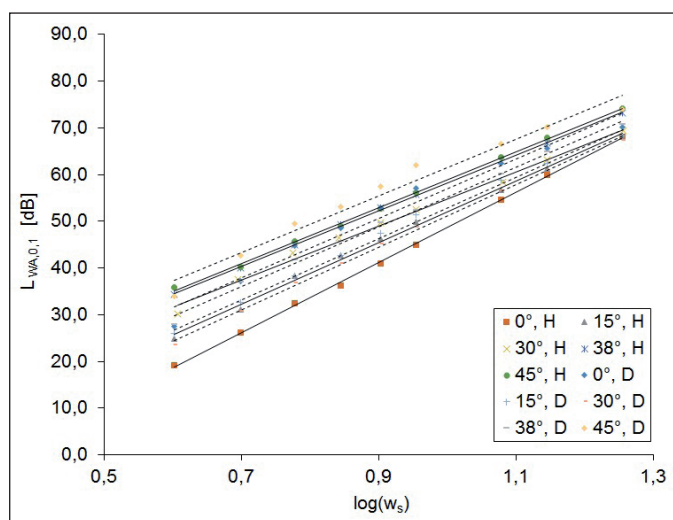
$$L_{W,0,1} = k_w \cdot \log(w_s) + k_p \quad (6)$$

resp. funkční závislost hladiny akustického výkonu A na střední rychlosti proudění

$$L_{WA,0,1} = k_{wA} \cdot \log(w_s) + k_{pA} \quad (7)$$

kde konstanty k_w a k_p (resp. k_{wA} a k_{pA}) jsou závislé na úhlu natočení lopatek a směru proudění a jsou dány pro jednotlivé diskutované případy v tab. 1 a 2 (resp. 3 a 4). Konstanta k_w (resp. k_{wA}) v závislosti akustického výkonu na střední rychlosti proudění představuje mocninu střední rychlosti proudění.

V diagramu na obr. 8 je prezentována závislost celkové hladiny akustického výkonu na logaritmu střední rychlosti proudění, v diagramu na obr. 9 pak závislost celkové hladiny akustického výkonu A na logaritmu střední rychlosti proudění.



Obr. 9 Závislost celkové hladiny akustického výkonu A na logaritmu střední rychlosti proudění vzduchu pro polohy lopatek H (regresní funkce plná čára) a D (regresní funkce čárkovaná čára), úhly natočení 0 až 45° a rychlosti 4 až 18 m/s

Tab. 1 Konstanty popisující závislost celkové hladiny akustického výkonu na logaritmu střední rychlosti proudění vzduchu při poloze lopatek H dle rovnice (6)

Úhel natočení lopatek	Konstanta k_w [-]	Konstanta k_p [-]	Nejistota výpočtu U [dB]	Součinitel korelace R^2 [-]
0°	52,28	1,67	2,5	0,9907
15°	48,48	8,09	2,3	0,9959
30°	40,98	19,39	2,4	0,9881
38°	43,26	20,83	2,3	0,9966
45°	45,83	18,37	2,3	0,9965

Tab. 2 Konstanty popisující závislost celkové hladiny akustického výkonu na logaritmu střední rychlosti proudění vzduchu při poloze lopatek D dle rovnice (6)

Úhel natočení lopatek	Konstanta k_w [-]	Konstanta k_p [-]	Nejistota výpočtu U [dB]	Součinitel korelace R^2 [-]
0°	43,39	17,08	2,5	0,9874
15°	43,70	14,30	2,3	0,9970
30°	45,42	12,28	2,4	0,9922
38°	42,42	19,41	2,6	0,9832
45°	41,33	26,22	2,7	0,9749

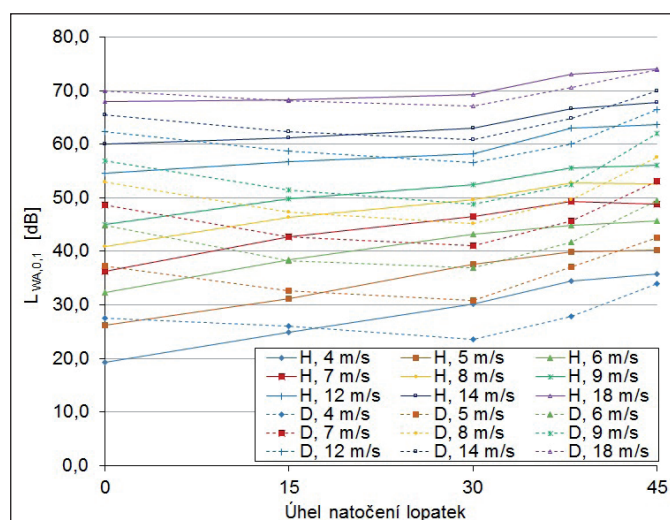
Na základě regresní rovnice (6) a konstant k_w a k_p v tab. 1 a 2 lze konstatovat, že funkční závislost akustického výkonu samotné lopatkové mříže při poloze lopatek H závisí na 4. až 5. mocnině střední rychlosti proudění vzduchu, při poloze lopatek D závisí na 4. až 4,5. mocnině střední rychlosti proudění vzduchu. Nejistota výsledků výpočtu je v rozsahu 2,3 až 2,7 dB.

Tab. 3 Konstanty popisující závislost celkové hladiny akustického výkonu A na logaritmu střední rychlosti proudění vzduchu při poloze lopatek H dle rovnice (7)

Úhel natočení lopatek	Konstanta k_{wA} [-]	Konstanta k_{pA} [-]	Nejistota výpočtu U [dB]	Součinitel korelace R^2 [-]
0°	75,01	-26,36	2,3	0,9993
15°	65,85	-13,83	2,4	0,9964
30°	57,78	-3,01	2,4	0,9933
38°	59,55	-1,34	2,3	0,9996
45°	59,83	-1,03	2,3	0,9986

Tab. 4 Konstanty popisující závislost celkové hladiny akustického výkonu A na logaritmu střední rychlosti proudění vzduchu při poloze lopatek D dle rovnice (7)

Úhel natočení lopatek	Konstanta k_{wA} [-]	Konstanta k_{pA} [-]	Nejistota výpočtu U [dB]	Součinitel korelace R^2 [-]
0°	63,56	-6,56	3,4	0,9689
15°	65,65	-12,76	2,4	0,9957
30°	66,83	-15,71	2,3	0,9980
38°	63,93	-8,70	2,5	0,9952
45°	60,64	0,92	3,2	0,9722



Obr. 10 Závislost celkové hladiny akustického výkonu A na úhlu natočení lopatek při konstantní střední rychlosti proudění vzduchu přes lopatkovou mříž pro rychlosti 4 až 18 m/s, plná čára poloha H, čárkovaná poloha lopatek D

Na základě regresní rovnice (7) a konstant uvedených v tab. 3 a 4 lze konstatovat, že funkční závislost akustického výkonu A samotné lopatkové mříže při poloze lopatek H závisí na 6. až 7,5. mocnině střední rychlosti proudění vzduchu, při poloze lopatek D závisí na 6. až 6,7. mocnině střední rychlosti proudění vzduchu.

Dle součinitele korelace R^2 jsou pro polohu lopatek H v tab. 3 vhodné zvolené regresní funkce pro proložení bodů a nejistota výpočtu dosahuje hodnot 2,3 až 2,4 dB. V případě polohy lopatek D ukazuje součinitel korelace vhodnost lineárního regresního proložení bodů u úhlu natočení 15 až 38°, nejistota výpočtu je zde do 2,5 dB. V případě úhlů natočení 0 a 45° je součinitel korelace nižší, nejistota je do 3,4 dB. Proložení bodů má v těchto případech spíše polynomický charakter 2. stupně než lineární.

POROVNÁNÍ HLUČNOSTI DVOU MĚŘENÝCH SMĚRŮ PROUDĚNÍ VZDUCHU NA LOPATKOVOU MŘÍŽ

Pro vzájemné vyhodnocení poloh lopatek D a H při různých úhlech natočení byla zvolena závislost celkové hladiny akustického výkonu A v závislosti na úhlu natočení při konstantní rychlosti.

Na základě diagramu na obr. 10 lze konstatovat, že při stejné poloze lopatek jsou křivky vůči sobě přibližně rovnoběžné.

Pro polohu lopatek H („ostřejší“ strana lopatky je náběžnou hranou) křivky označeny plnou čarou, což odpovídá výdechové vyústce, platí rostoucí závislost celkové hladiny akustického výkonu A s rostoucím úhlem natočení od svislé polohy. Tudiž nejhluchnější je lopatka pro měřený rozsah úhlů 0° až 45° při úhlu natočení 45°.

Pro polohu lopatek D (zaoblená širší strana lopatky je náběžnou hranou vůči proudu vzduchu) křivky označené čárkovaně, což odpovídá sací vyústce, platí, že nejméně hlučné jsou lopatky při úhlu natočení 30° od svislé polohy. Od úhlu natočení 30° k úhlu 45° lopatka generuje více hluk než při natočení lopatky blíží se poloze (0°).

ZÁVĚR

Na základě výsledků provedených měření aerodynamického hluku při obtékání vzduchu lopatkovou mříží běžně užívanou v systémech VZT při

úhlech natočení lopatek 0 až 45°, rozsah rychlostí 4 až 18 m/s, lze konstatovat následující:

- ❑ Extrémy vyzařování hluku v relativních spektrech hladin akustického výkonu jsou při Strouhalových číslech 0,08, 0,15 a 0,25. Při nízkých rychlostech 4 až 7 m/s jsou obsaženy ve spektru hluku většinou všechny 3 extrémy. Při vyšších rychlostech počet extrémů postupně ubývá a výskyt se soustředí k $Sh \sim 0,15$. Při nízkých rychlostech 4 až 7 m/s je relativní spektrum tvarově užší, extrémy jsou ostré a mají dominantní vliv na celkovou součtovou hladinu akustického výkonu a hrozí zde výskyt tónové složky. Při rychlostech vyšších, při 12 až 18 m/s, je spektrum hluku širší a zaoblenější, extrémy jsou nižší a hrají menší roli v celkové součtové hladině. Pravděpodobně dochází k rozbití pravidelných vírů za lopatkou a tím k eliminaci tzv. Strouhalových tónů.

Výše uvedené informace vesměs nezávisí na poloze lopatky H či D, resp. na úhlu natočení lopatky. Jistá pravidla zde však jsou, ale tvary spekter jsou natolik rozmanité, že lze jen těžko z počtu provedených měření vytvořit obecnější závěry.

- ❑ Při poloze lopatek H je hladina akustického výkonu závislá na 4. až 5. mocnině střední rychlosti proudění vzduchu, při poloze lopatek D je závislá na 4. až 4,5. mocnině střední rychlosti proudění vzduchu, což odpovídá teorii při nízkých Machových číslech (pro $Ma \leq 0,12$). Závislost hladin akustického výkonu A při poloze lopatek H je dána 6. až 7,5. mocninou střední rychlosti proudění vzduchu, při poloze lopatek D pak 6. až 6,7. mocninou střední rychlosti proudění vzduchu.
- ❑ Při poloze lopatek označených H (výdechová vyústka) roste celková hladina akustického výkonu A se zvětšujícím se úhlem natočením lopatky od svislé polohy. Růst je přibližně lineární v rozsahu měřených úhlů (0 až 45°).
- ❑ Při poloze lopatek označených D (sací vyústka) je nejnižší vyzařování hluku, resp. nejnižší celková hladina akustického výkonu A, při úhlu natočení 30° od svislé polohy lopatky.
- ❑ Při vzájemném porovnání hlučnosti dle obr. 10 polohy lopatek D (čárkovaná čára) a H (plná čára) lze konstatovat následující:
 - natočení 0° dominantnější zdroj hluku je poloha D,
 - natočení 15° obě polohy H a D jsou přibližně rovnocenné,
 - natočení 30° a 38° dominantnější zdroj hluku je poloha H,
 - natočení 45° dominantnější zdroj hluku je většinou poloha D.
 Při vyšší rychlosti proudění vzduchu se rozdíl hlučnosti samotných lopatek obou poloh D a H při úhlech natočení lopatek 0 až 45° zmenšuje.

Kontakt na autora: miroslav.kucera@fs.cvut.cz

Použitá literatura:

- [1] BERANEK LEO L. *Snižování hluku*. Praha: SNTL 1965, 710 s. DT 534.83
- [2] KRÁLÍČEK, J. *Hluk koncových elementů VZT*. Praha, 2014. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.
- [3] KUČERA, M. *Aerodynamické zdroje hluku při nízkých Machových číslech*. Praha, 2010. Disertační práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.
- [4] LIGHTHILL M., I. On Sound Generated Aerodynamically, Part I, General Theory. *Proceedings of the Royal Society, ser. Vol. A. 211, No. 1107*. 1952, pp. 564 – 578.
- [5] NOVÝ, R. *Hluk a chvění*. Ediční středisko ČVUT, 2000, 389 s. ISBN 80-02246-3.
- [6] PUTTA, L. *Optimalizace distribuce vzduchu z hlediska hluku*. Praha, 2000. Disertační práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní. ■

Úprava chladicí vody – jde to bez chemie?

Adiabatické chlazení je typickým zdrojem zárodků přenášených vzduchem. Provozovatel zařízení nese odpovědnost za minimalizaci rizik těchto zařízení. Nová směrnice VDI 2047 list 2 dává návod k hygienickému provozu a platí pro stávající a nově do provozu uváděná zařízení. Jde to bez biocidů a bez chemie?

V Německu je provozováno mnoho těchto zařízení a v podstatě všechna nejsou riziko zdroje legionelových infekcí. Případy v Neu-Ulmu (2010), Warsteinu (2013) a v Jülichu (2014) máme před očima. Zdrojem infekce se stávají v případě, že se sejdou následující faktory:

- ❑ ve vodním systému jsou k dispozici virulentní kmeny,
- ❑ v zařízení jsou dobré podmínky k množení legionelly,
- ❑ aerosoly obsahující legionelly unikají ze zařízení,
- ❑ povětrnostní podmínky umožňující šíření a přežívání legionelly,
- ❑ vdechování legionelových aerosolů citlivými osobami.

Při splnění všech faktorů může dojít k jejich rozšíření do okruhu mnoha kilometrů a infekci stovek lidí. Jelikož nelze vnikání legionell do vodních systémů zcela zabránit, je nutno omezit jejich šíření a výstup ze zařízení. Pomoc nabízí nové vydání směrnice VDI 2047 díl 2. Popisuje nejen hygienické aspekty zařízení a provozu, ale i koncepci školení odpovědných osob. Protože se chladicí voda tradičně upravuje pomocí biocidů, odkazuje VDI 2047 díl 2 i na požadavky směrnice BioStoff V a směrnice o nebezpečných látkách GefStoff V. Jde to tedy bez chemie?

Düsseldorfská firma Dynamic Aquabion Tower (DAT) odpovídá pozitivně. Její systémy bez biocidů nebo stabilizátorů tvrdosti jsou zajímavé nejen z hlediska životního prostředí a hygieny, ale i podle nákladů. Proces spočívá v 5 krocích:

- ❑ filtrace nerozpouštěných látek od velikosti 0,25 µm,
- ❑ při fixaci biologických živin na minimum nejsou biocidy nutné,
- ❑ likvidace zárodků a dezinfekce, např. UV zářením,
- ❑ upuštění od měkčení vody nasazením obětované zinkové anody,
- ❑ elektronické řízení procesu.

V procesu Coolzon se pracuje v podstatě s filtrací a dezinfekcí vody tvorbou ozónu bez použití biocidů a toxických chemikálií, kde se ozón zcela odbourává.

Pramen: Newsletter Vogel Process, 19. 2. 2015

(AB)

Elektrické automobily mohou ušetřit za klimatizaci

Pro životní prostředí mohou elektromobily udělat více než jen snížit emise a ušetřit fosilní paliva. Mohou učinit letní vedra snesitelnějšími. Výzkum prokázal, že elektromobily vytváří chladicí efekt v městských aglomeracích, protože neprodukují teplo v dopravních zácpách. To snižuje nároky na klimatizaci a její výkon. Tak se např. v Pekingu v létě roku 2012 projevil rozsáhlý přechod na elektromobily úsporou 11,779 tun emisí CO₂ denně a úsporou 14,4 kW elektrického výkonu. Efekt by byl ještě větší, pokud by bylo v Pekingu dost míst pro dobíjení baterií.

Na přechod celých měst na elektromobily je samozřejmě brzo i u takových ekologicky uvědomělých aglomerací, jako je oblast kolem zálivu San Francisco. Efekt se také neprojeví v místech, kde se teplo rozptýlí. Studie však naznačila, že elektromobily mají vedlejší příznivé dopady, dříve neuvažované.

Pramen: msn news 23. 3. 2015

(AB)

DuPont s novými chladivými

Nová chladiva DuPont, založená na hydrofluorolefinech (HFO), nabízí ve srovnání s dosud používanými substancemi výhody lepší energetické účinnosti a výrazně nižší hodnoty potenciálu GWP.

Ve středu pozornosti je nové nehořlavé chladivo Opteon XP40 (R449A) s nízkým potenciálem GWP 1 397 a s podobnými termodynamickými vlastnostmi jako rozšířená chladiva pro normální a hluboké chlazení R404A a R507 s hodnotami GWP přes 3 900. S lepší energetickou účinností je vhodné jak pro nová zařízení, tak pro retrofit starších.

Dalším výhodným a nehořlavým chladivem je Opteon XP44 (R452A) jako blend chladiv R32, R125 a R1234yf s podobnými aplikačními a termodynamickými vlastnostmi jako R404A, avšak s GWP 2 140. Společnost chladivských dopravců Thermo King si je vybrala jako firemní chladivo pro své vozy. Konečně je možno zmínit i chladivo Opteon XP10 (R513A), blend HFO/HFC a mající GWP jen 631, nehořlavé a navržené jako náhrada R134A pro stacionární chladicí systémy.

Pramen: CCI 11/2014, s. 23

(AB)