



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

## VÝZKUM EFEKTIVNÍCH ZPŮSOBŮ ODSÁVÁNÍ

RESEARCH ON EFFECTIVE METHODS OF EXHAUSTING

## TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

### OBOR

STUDY PROGRAMME

**Konstrukční a procesní inženýrství**

DESIGN AND PROCESS ENGINEERING

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Ing. Ondřej Pech**

### ŠKOLITEL

SUPERVISOR

**prof. Ing. Milan Pavelek, CSc.**

### OPONENTI

OPPONENTS

**prof. Ing. Josef Černecký, CSc.**

**Doc. Ing. Zdeněk Kratochvíl, CSc.**

### DATUM OBAHAJOBY

DATE OF DEFENSE

**15. 12. 2017**

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Lokální odsávání, zesílený odsávací systém, REEXS, štěrbinový sací nástavec.

## **KEYWORDS**

Local exhaust system, reinforced exhaust system, REEXS, slot exhaust hood.

## **MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE**

*Dizertační práce je dostupná v tištěné podobě na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno.*

# OBSAH

Úvod.....	5
1 Větrací systémy .....	7
2 Měřicí trať .....	9
2.1 Zesílený štěrbinový sací nástavec.....	10
2.2 Měřicí systém.....	12
3 Vizualizace proudění z přívaděcí výustky.....	12
4 Měření účinnosti odsávání štěrbinového sacího nástavce.....	14
4.1 Výsledky účinnosti odsávání ve volném prostoru – přívod dvěma štěrbinami ...	16
4.2 Výsledky měření účinnosti odsávání s pracovním stolem v úrovni spodní hrany odsávací štěrbinou – přívod štěrbinou .....	17
4.3 Výsledky měření účinnosti odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbinou – přívod štěrbinou .....	17
4.4 Porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrbinou s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbinou .....	18
5 Měření rychlostních polí štěrbinového sacího nástavce.....	20
5.1 Porovnání rychlostí v ose odsávací štěrbinou s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbinou .....	21
6 Energetická náročnost sacích nástavců .....	23
7 Nejistoty měření .....	25
Závěr .....	25
Seznam použitých zdrojů.....	28
Životopis autora .....	29
Abstrakt.....	30
Summary .....	30



## VYMEZENÍ CÍLŮ DIZERTAČNÍ PRÁCE

Dílčí cíle dizertační práce lze v souladu se závěry státní doktorské zkoušky formulovat do následujících bodů:

- Provedení úprav zesíleného sacího systému v blízkosti pracovního stolu pro zvýšení účinnosti odsávání.
- Proměření účinnosti odsávání a obrazů proudění na upraveném zařízení.
- Zhodnocení energetické náročnosti zařízení.

# ÚVOD

V průmyslové výrobě jsou výrobními technologiemi generovány různé exhaláty. Tyto exhaláty (plynné, kapalné, ale i pevné) jsou převážně zdraví škodlivé, a proto jejich množství v pracovním prostředí musí být co nejnižší a nesmí překročit nejvyšší přípustnou koncentraci ve vzduchu. Pro snížení koncentrace škodlivin v pracovním prostředí se obvykle používá nucené větrání, které je možné rozdělit na celkové větrání a lokální větrání.

Celkové větrání reguluje koncentraci škodlivin ve větraném prostoru ředěním škodlivin přívodem čerstvého vzduchu. Oproti tomu lokální větrací systémy odsávají znečištěný vzduch přímo u zdroje jejich vzniku, tím snižují zatížení větraného prostoru škodlivinami, čímž snižují také energetické nároky na větrání.

Nevýhodou lokálních větracích systémů je, že rychlost vzduchu před sacím nástavcem se zvětšující se vzdáleností rychle klesá. Z toho důvodu je nutné umístit vyústění nástavce co nejbližší ke zdroji znečištění, což může interferovat s výrobní technologií nebo omezovat pracovníka, a proto tyto pracovníci často nepoužívají žádné lokální odsávání. Při návrhu sacího nástavce by měla být také zajištěna dostatečná rychlost odsávaného proudu vzduchu blízko zdroje škodlivin, která musí být větší než rychlost šířící se škodliviny. První možností je omezení odsávání pouze na prostor, ve kterém jsou generované škodliviny např. přírubou nebo ve větším rozsahu nějakým typem obestavení např. pracovním stolem – přepážkou, či částečným nebo úplným zákrytem. Možnou alternativou skýtá využití zesíleného odsávacího systému, který využívá kromě odsávání ještě přívodu vzduchu pro intenzifikování a prodloužení účinné oblasti odsávání. Kombinací tohoto zesíleného odsávacího systému s obestavením pomocí pracovního stolu – přepážky lze prodloužit účinnou oblast ale také zvýšit celkovou účinnost odsávání bez výrazného omezení pracovníka. Na účinnost a dosah odsávání mají také vliv vlastnosti generované škodliviny. Pokud má škodlivina větší hustotu než vzduch, může docházet při použití pracovního stolu k jejímu zachycení pracovním stolem a následnému odsátí, čímž se může účinnost ještě dále zvětšovat. Při generování škodliviny s menší hustotou, než má okolní vzduch se dosah odsávání může zkracovat.

Předkládaná dizertační práce se věnuje zesílenému odsávacímu systému v blízkosti pracovního stolu – přepážky, na kterém byly navrženy a provedeny úpravy přívodu vzduchu pro zvýšení účinnosti odsávání. Účinnost odsávání byla zkoumána metodou stopového plynu, kdy se stopový plyn ( $\text{CO}_2$ ) přivádí ve zvolených místech před sacím nástavcem a je vyhodnocována koncentrace stopového plynu v odsávaném vzduchu. Jelikož má použitý stopový plyn větší hustotu než okolní vzduch, bylo přistoupeno k úpravě polohy přepážky. Přepážka byla přesunuta nad odsávací šterbinu, což modeluje pracovní stůl se škodlivinami lehčími než vzduch, např. od svařování, pájení aj. Poté byla změřena účinnost odsávání původního a upraveného zesíleného sacího nástavce s přepážkou ve dvou polohách nad odsávací šterbinou.

Byly také vizualizovány výstupní proudy přiváděného vzduchu, proměřena rychlostní pole a porovnány energetické náročnosti jednotlivých konfigurací zesíleného odsávacího systému s přepážkou ve dvou polohách nad odsávací šterbinou.

# 1 VĚTRACÍ SYSTÉMY

Pro zajištění čistého ovzduší ve vnitřních prostorech se využívá větrání, kterým se provádí výměna vzduchu ve vnitřních prostorech za vzduch venkovní. Výměnu vzduchu je možné dosáhnout přirozeným větráním (provětrávání<sup>1</sup>, infiltrace<sup>2</sup>, aerace<sup>3</sup>, šachtové větrání<sup>4</sup>) využívajícího různých hustot vnitřního a venkovního vzduchu, nebo nuceným větráním pomocí větracích systémů. Přirozené a nucené větrání je také možné kombinovat. Nucené větrání lze dále rozdělit na větrání celého prostoru nebo pouze jeho části. Poté hovoříme o tzv. celkovém a lokálním větrání.

Celkové větrání je využíváno v případě rovnoměrně zastoupených škodlivin v prostoru, nebo pokud nelze předem určit místo vzniku škodlivin. Oproti tomu lokální větrání se navrhuje do prostorů s většími zdroji škodlivin soustředěnými do vymezeného prostoru. Lokální větrání je možné využít pro přívod čerstvého vzduchu do míst pobytu lidí tzv. lokální zavzdušnění (vzduchová sprcha, oáza, clona). Druhou variantou je lokální odsávání, tj. odvod škodlivin od zdroje jejich vzniku.

Lokální odsávání zajišťuje odsávání škodlivin nebo nadměrného tepla v místě jejich vzniku a odvedení z místnosti, případně jeho filtrace a recirkulace do místnosti. Koncentrace škodlivin v odváděném vzduchu bývají podstatně vyšší než u celkového větrání, kde koncentrace v prostoru nesmí překročit nejvyšší přípustné hygienické limity. Díky tomu lokální odsávání snižuje zatížení větraného prostoru škodlivinami, a současně snižuje také nároky na celkové větrání. Z tohoto důvodu je také pro stejný zdroj škodlivin úspornější než celkové větrání. Lokální odsávání se nejčastěji používá u ručních operací, svářecích či pájecích stolů, výrobních linek apod. (Janotková 1991).

Důležitou součástí zařízení pro lokální odsávání je sací nástavec, který zachycuje škodliviny v místě jejich vzniku a jehož konstrukcí je možné značně ovlivnit množství zachycených škodlivin.

Velkou nevýhodou sacích nástavců je, že rychlost vzduchu před sacím nástavcem se zvětšující se vzdáleností rychle klesá. Z toho důvodu je nutné umístit vyústění nástavce co nejbližší ke zdroji znečištění. Při návrhu sacího nástavce by měla být také zajištěna dostatečná rychlost odsávaného proudu vzduchu blízko zdroje škodlivin, která musí být větší než rychlost šířící se škodliviny. Stejně tak objemový průtok nasávaného vzduchu musí být větší než objemový průtok generovaný zdrojem škodlivin. Proud vzduchu by měl být usměrněn do sacího nástavce.

Při použití tradičního sacího nástavce dochází k přísávání neznečištěného vzduchu za sacím nástavcem a tím se snižuje koncentrace škodlivin v odsávaném vzduchu a dosah odsávání. Tento jev je možné omezit, nebo úplně eliminovat použitím dostatečně velké příruby kolem sacího nástavce, příruba také snižuje tlakové ztráty na vstupu do odsávacího otvoru (ACGIH 2016; Fletcher 1977; Fletcher 1978). Avšak pokles rychlosti proudu odsávaného vzduchu je úměrný čtverci vzdálenosti, resp. šířce štěrbin a vzdálenosti od výustky, a v obou případech se téměř neliší. Možnou alternativou je využití zesíleného odsávacího systému.

Zesílený odsávací systém také známý jako REEXS<sup>5</sup> využívá zesílený sací nástavec nazýván také jako Aabergův sací nástavec (Aaberg 1968). Jde o tradiční sací nástavec, který je vybaven jednou nebo více štěrbinami pro přívod vzduchu. Tento přiváděný proud vzduchu vytváří imaginární přírubu, která vymezuje odsávaný prostor. Navíc přiváděný proud s sebou strhává okolní vzduch a tím ještě umocňuje proudění před nástavcem směrem k odsávacímu otvoru. Poté vhodným nastavením poměru hybnostních toků přiváděného a odsávaného vzduchu je možné částečně změnit oblast účinného odsávání a tím dosáhnout lepších výsledků odsávání viz obr. 1.1b.

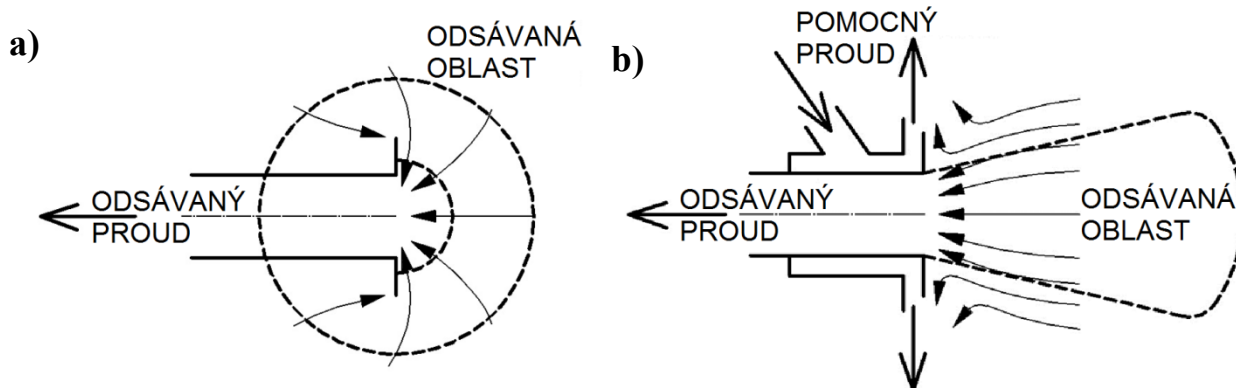
<sup>1</sup> Přirozené větrání otevíráním okny.

<sup>2</sup> Nebo také provzdušňování je přirozené větrání netěsnostmi spárami oken a dveří.

<sup>3</sup> Přirozené větrání regulovatelnými větracími otvory ve stěnách a ve střeše.

<sup>4</sup> Přirozené větrání, při kterém dochází k odvodu větracího vzduchu šachtou (komínem).

<sup>5</sup> REinforced EXhaust System (Aaberg 1968)



Obr. 1.1 – Zobrazení proudnic (Krejčí 2006) před:  
**a)** tradičním sacím nástavcem  
**b)** zesíleným sacím nástavcem

Pro zesílený odsávací systém Hyldgard (Hyldgard 1987) definoval kritickou rychlost jako minimální výtokovou rychlost, která je nezbytná pro překonání sacího efektu, aby nedošlo k vtažení přiváděného proudu do odsávacího otvoru a vzniku tzv. hydraulického zkratu. zjistil, že kritická rychlost je přímo úměrná odsávanému hmotnostnímu toku a že pro daný sací nástavec může být snížena zvětšením šířky štěrbin. Dále pak definoval pracovní parametr  $I$  jako poměr hybnostních toků přiváděného a odsávaného vzduchu:

$$I = \frac{\dot{m}_{př} \cdot w_{př}}{\dot{m}_{od} \cdot w_{od}}, \quad (1.1)$$

kde:

$I$	[1]	– pracovní parametr,
$\dot{m}_{př}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	– hmotnostní průtok přiváděného vzduchu,
$\dot{m}_{od}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	– hmotnostní průtok odsávaného vzduchu,
$w_{př}$	[m·s <sup>-1</sup> ]	– rychlost proudění vzduchu z přiváděcí štěrbin,
$w_{od}$	[m·s <sup>-1</sup> ]	– rychlost odsávaného vzduchu ve vstupním průřezu.

Při návrhu zesíleného odsávacího systému se mohou vyskytnout různé problémy a nedostatky spojené s konkrétním řešením. Optimální provozní podmínky zesíleného odsávacího systému nemusí být v souladu s technologickými a pracovními požadavky. Proto je vhodné při návrhu vzít v úvahu následující faktory ovlivňující jeho použití (Goodfellow a Tahti 2001):

- konečná velikost místnosti,
- pohybující se zdroje a pohybující se pracovníci,
- pohyb částic ve vzduchu,
- neustálenost a nesměrovost proudu při vyšších hodnotách poměru hybnostních toků,
- vyšší pořizovací náklady odsávacího zařízení,
- vyšší náklady na další úpravy zařízení.

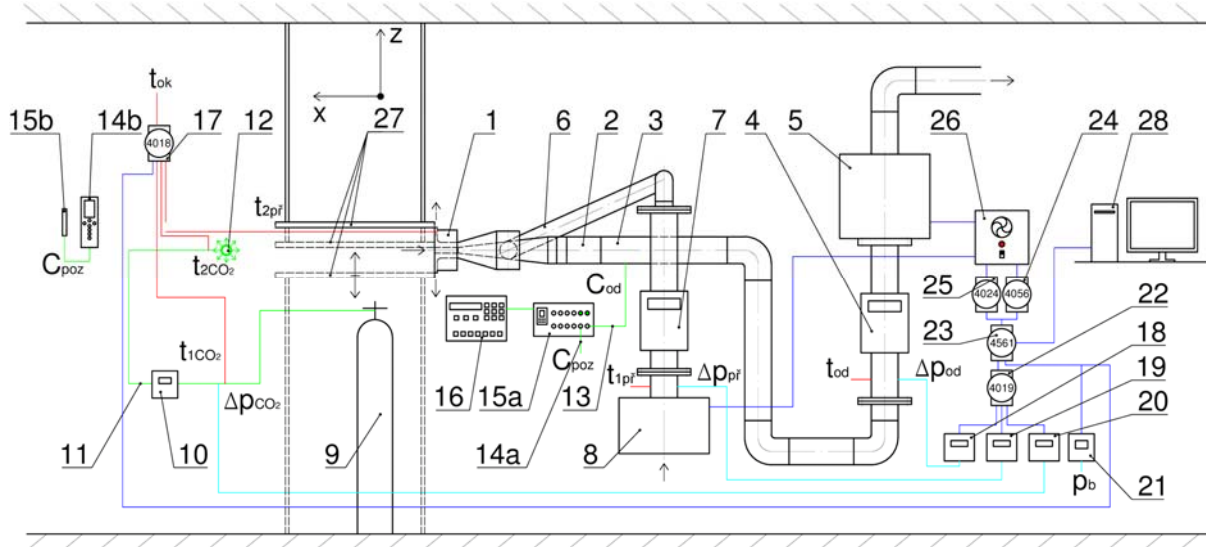
Výhody:

- pro stejný dosah nižší hladina hluku,
- větší dosah,
- větší provozní pohoda pracovníků s možností práce ve větším prostoru, což jsou důležité parametry pro rozvoj zesílených sacích nástavců.

## 2 MĚŘICÍ TRATĚ

Zařízení pro testování a výzkum sacích nástavců bylo na Energetickém ústavu, FSI, VUT v Brně navrženo, sestaveno (Patočka a Janotková 2000) a postupně zdokonalováno. Pro dané experimenty bylo zařízení částečně automatizováno a dále upravováno, aby mohlo pracovat ve třech hlavních konfiguracích se štěrbinovým sacím nástavcem – ve volném prostoru, s pracovním stolem – přepážkou pod sacím nástavcem a s přepážkou nad odsávací štěrbinou.

Měřicí trať schematicky zakreslená na obr. 2.1 je složena ze tří hlavních částí: odsávací větve, přívodní větve a zařízení pro měření se stopovým plynem.



Obr. 2.1 – Schémata zařízení pro testování a výzkum sacích nástavců

- 1 – zesílený sací nástavec, 2 – vířič, 3 – úsek pro měření koncentrací, 4 – plovákový průtokoměr v odsávací větvi, 5 – odsávací ventilátory, 6 – přívodní potrubí, 7 – plovákový průtokoměr v přívodní větvi, 8 – přívodní ventilátor, 9 – tlaková láhev se stopovým plynem a redukčním ventilem, 10 – průtokoměr stopového plynu, 11 – hadičky pro přívod stopového plynu, 12 – všesměrové zakončení zdroje stopového plynu, 13, 14a – teflonové hadičky pro odběr vzorků vzduchu, 14b – multifunkční měřicí přístroj, 15a – přepínač měřicích míst, 15b – sonda Indoor air quality, 16 – analyzátor plynů, 17 – modul pro měření teploty, 18 – převodník měření tlaku v odsávací větvi, 19 – převodník měření tlaku v přívodní větvi, 20 – převodník měření tlaku stopového plynu, 21 – převodník měření barometrického tlaku, 22 – převodník signálů z převodníků tlaku, 23 – komunikační modul, 24 – spínací modul, 25 – analogový modul, 26 – triackové regulátory, 27 – nastavitelná přepážka (pracovní stůl) 830×1900 mm, 28 – PC.

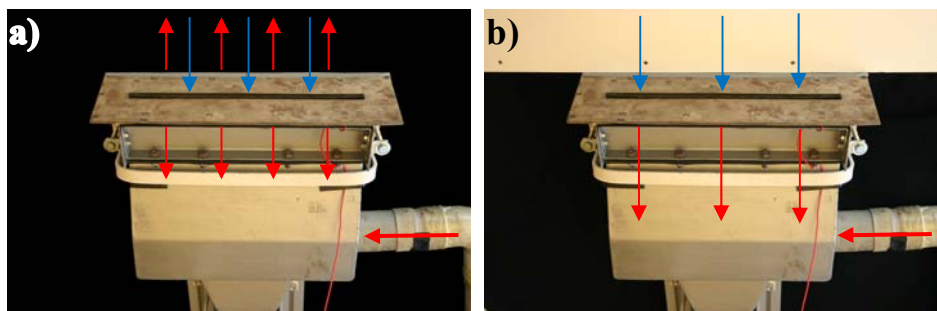
Pro polohování zdroje stopového plynu a termo-anemometrických sond u zesíleného sacího systému v konfiguraci 1. – 3. z tab.2.1 (str. 11) a při měření zachytné vzdálenosti byl použit pojezdový vozík vybavený vertikálně posuvným ramenem. Vozík se pohybuje po kolejnicích, čímž umožňuje ustavit zdroj stopového plynu nebo termo-anemometry do požadované polohy na zvolené síti měřicích bodů. Pro rychlejší a přesnější ustavení v ose  $x$  je na vozík umístěna měřicí ručička a na kolejnice metr.

Při měření zesíleného sacího systému v konfiguraci 4. – 9. z tab.2.1 (str. 11) byl pro polohování zdroje stopového plynu a termo-anemometrických sond použit tříosý traverzovací systém s kontrolérem C142-4 od firmy Isel – automation, namontovaný na konstrukci z hliníkových profilů BOSCH 60 × 60 mm, který umožňuje nezávislé polohování ve třech osách, čímž se značně zjednodušilo polohování.

## 2.1 Zesílený štěrbinový sací nástavec

V práci je zkoumán zesílený štěrbinový sací nástavec ve čtyřech základních variantách viz níže. Tyto základní varianty byly použity v různé konfiguraci, jak ukazuje tab. 2.1 (str. 11):

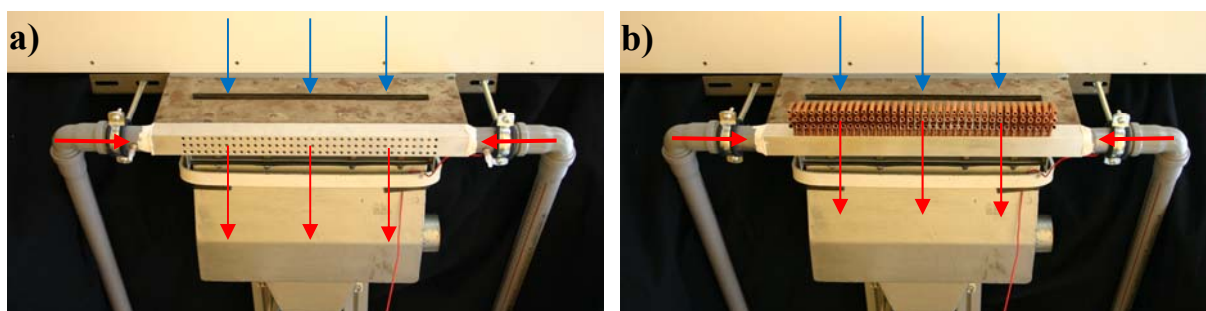
- zesílený štěrbinový sací nástavec ve volném prostoru – přívod vzduchu dvěma štěrbinami v přírubě (obr. 2.2a),
- zesílený štěrbinový sací nástavec s přepážkou (pracovním stolem) – přívod vzduchu jednou štěrbinou v přírubě (obr. 2.2b),
- zesílený štěrbinový sací nástavec s přepážkou – přívod vzduchu dírkami v přírubě (obr. 2.3a),
- zesílený štěrbinový sací nástavec s přepážkou – přívod vzduchu trubičkami v přírubě (obr. 2.3b).



Obr. 2.2 – Zesílený štěrbinový sací nástavec:

*a) ve volném prostoru – přívod vzduchu dvěma štěrbinami v přírubě*

*b) s přepážkou (pracovním stolem) – přívod vzduchu jednou štěrbinou v přírubě*



Obr. 2.3 – Zesílený štěrbinový sací nástavec:

*a) s přepážkou – přívod vzduchu dírkami v přírubě*

*b) s přepážkou – přívod vzduchu trubičkami v přírubě*

Měření účinnosti odsávání ve volném prostoru (konfigurace 1. z tab. 2.1 na str. 11) byla provedena Bouzkem (Bouzek 2004) na Odboru termomechaniky a techniky prostředí, FSI, VUT v Brně.

Měření s pracovním stolem již byla provedena v rámci této práce. Z vyhodnocení účinnosti odsávání konfigurace 1. – 3. z tab.2.1 (str. 11) bylo vyvozeno, že oblast účinného odsávání v případě umístění sacího nástavce ve volném prostoru je značně menší oproti případům s pracovním stolem. Tento rozdíl je způsoben zejména rozdílnou hustotou stopového plynu ( $\text{CO}_2$ ) a vzduchu, kdy v případě s pracovním stolem je klesající stopový plyn částečně odsán a částečně zachycen pracovním stolem, ze kterého je následně odsán. Vliv hustoty stopového plynu je také dále rozebrán v kapitole 4.

Pro výzkum chování nástavce u pracovního stolu se škodlivinou lehčí než okolní vzduchu (teplé zplodiny při svařování) je potřeba při aplikaci daného stopového plynu  $\text{CO}_2$  umístit přepážku vertikálně symetricky nad odsávací štěrbinu. Pro tyto účely byla navržena konfigurace 4. a 5.

s přepážkou nad odsávací štěrbinou, kdy se stopový plyn (CO<sub>2</sub>) díky rozdílné hustotě oproti vzduchu vzdaluje od pracovního stolu ve směru osy  $-z$ , čímž se chová vůči stolu, který by byl ve standardní poloze jako plyn lehčí než vzduch.

Dalším úkolem bylo provést úpravy zesíleného sacího systému v blízkosti pracovního stolu pro zvýšení účinnosti odsávání. Z výsledků autorů Gublera a Krejčího, kteří se nejvíce věnovali přívodnímu proudu vyplynulo, že zesilující účinky by mohla zlepšit turbulizace proudění, a proto byla věnována větší pozornost přívodnímu proudu. Za tímto účelem byla navržena úprava přívodu vzduchu pro vytvoření větší třecí plochy přívodního proudu, kdy je místo štěrbiny využito tří řad trubiček (vnější  $\phi 6$  mm, vnitřní  $\phi 4$  mm) po 36 ks, která byla měřena v konfiguraci 8. a 9. Tvarování trubiček a jejich vetknutí do základního přívodního profilu (čtvercový uzavřený profil  $30 \times 30 \times 2$  mm) bylo značně náročné a případná sériová výroba by byla nákladná, proto pro porovnání byla navržena ještě výrobně jednodušší varianta, která využívá přívodních dírek v základním přívodním profilu stejných rozměrů a byla dále měřena v konfiguraci 6. a 7.

Rychlost v odsávací štěrbíně byla dle doporučení v literatuře (Chyský a Hemzal 1993) a vzhledem k dříve provedeným měřením bez pracovního stolu (Bouzek 2004) nastavena na  $w_{od} = 8.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a udržována konstantní. Průtok přiváděného vzduchu byl udržován konstantní dle požadavku na zvolenou hodnotu pracovního parametru  $I$  dle rov (1.1).

Tab. 2.1 – Konfigurace a rozměry použitých variant zesíleného odsávacího systému

Konfigurace zesíleného odsávacího systému	Příruba	Odsávací štěrbina		Přívod			
	Rozměr [mm]	Rozměr [mm]	Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Typ	Počet [ks]	Rozměr [mm]	Plocha [mm <sup>2</sup> ]
1. Ve volném prostoru	405×135	320×15	4800	štěrbina	2	325×4	2600
2. S pracovním stolem – přepážkou v úrovni spodní hrany příruby	405×135			štěrbina	1		
3. S pracovním stolem – přepážkou v úrovni spodní hrany odsávací štěrbiny	405×75			štěrbina	1		
4. S přepážkou v úrovni horní hrany příruby	405×135			štěrbina	1		
5. S přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbiny	405×75			štěrbina	1		
6. S přepážkou v úrovni horní hrany příruby	405×165			$\phi 4$	1357	dírky	108
7. S přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbiny	405×105					dírky	108
8. S přepážkou v úrovni horní hrany příruby	405×165					trubičky	108
9. S přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbiny	405×105					trubičky	108

## 2.2 Měřicí systém

Všechna měření jsou prováděna pomocí programu Adamview od firmy Advantec, který získává data přes komunikační modul (pozice 23 v obr. 2.1). V aktuálním čase jsou tato data upravena podle kalibračních rovnic jednotlivých přístrojů a převodníků a jsou dopočítány skutečné hodnoty podle aktuálních teplot a tlaků. Pro vizualizaci těchto hodnot je v tomto programu vytvořen virtuální měřicí přístroj (Pech a Pavelek 2012), který zobrazuje přepočítané (skutečné) veličiny – teploty, tlaky, objemové a hmotnostní průtoky, rychlosti v odsávací a přívodní štěrbině a pracovní parametr  $I$  zesíleného sacího nástavce (poměr hybnostních toků přiváděného a odsávaného vzduchu) dle rov. (1.1) (Hyldgard 1987).

## 3 VIZUALIZACE PROUDĚNÍ Z PŘIVÁDĚCÍ VÝUSTKY

Vizualizace proudění kouřovou metodou v okolí zesíleného štěrbinového sacího nástavce v blízkosti pracovního stolu – přepážky přesněji vizualizace odsávání, byla provedena v rámci pojednání ke státní doktorské zkoušce (Pech 2013). Na základě literární rešerše dále vyplynulo, že zesilující účinky by mohla zlepšit turbulizace proudění, a proto byla věnována větší pozornost přívodnímu proudu.

V práci byla proto vizualizace kouřovou metodou využita pro vizualizaci proudu vzduchu vystupujícího z přívodní štěrbin, dírek a trubiček. Pomocí laserové roviny byly osvětleny dvě svislé roviny – první kolmá na přírubu jdoucí středem příruby a druhá rovnoběžná s přírubou jdoucí středem přívaděcí štěrbin, resp. prostřední řadou dírek nebo trubiček. V tomto případě je kouř vytvořený generátorem přiváděn do sání přívodního ventilátoru.

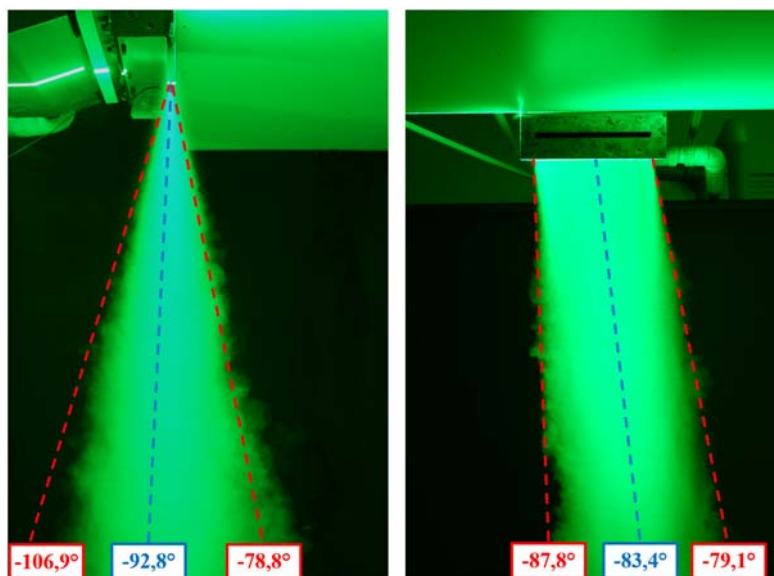
Fotoaparát byl umístěn kolmo na světelnou rovinu a byla pořízena série 15–34 snímků následně bylo k obrazové analýze vybráno 7–15 snímků. Přednostně byl vybírán každý druhý pořízený snímek pro zohlednění chování proudu v průběhu celé doby fotografování.

Vybrané snímky byly analyzovány v softwaru Interfer. Tento program slouží pro obrazovou analýzu snímků pořízených při kouřové vizualizaci. Na snímky byla aplikována detekční metoda určování hranice kouře v místě změny intenzity světla vůči okolí (tzv. podle paty).

Vyhodnocené průměrné hodnoty okrajů, osy a rozšíření proudu z přívaděcí štěrbin, resp. dírek nebo trubiček jsou vyznačené do pořízených (referenčních) snímků jednotlivých variant.

Přívodní proud vzduchu ze štěrbin v rovině kolmé na přírubu jdoucí středem příruby (obr. 3.1 vlevo) je relativně symetrický s průměrným rozšířením  $28,1^\circ$ . Jeho osa se pouze mírně odklání (o  $2,8^\circ$ ) od pracovního stolu.

V rovině rovnoběžné s přírubou jdoucí středem přívaděcí štěrbin (obr. 3.1 vpravo) je již ale situace v daném zařízení jiná. Dochází zde totiž k výraznějšímu odklonu proudu vpravo. Osa proudu se průměrně odklání od svislého směru o  $6,6^\circ$ . Tato asymetrie je způsobena přívodem vzduchu ke štěrbině pouze z jedné strany.



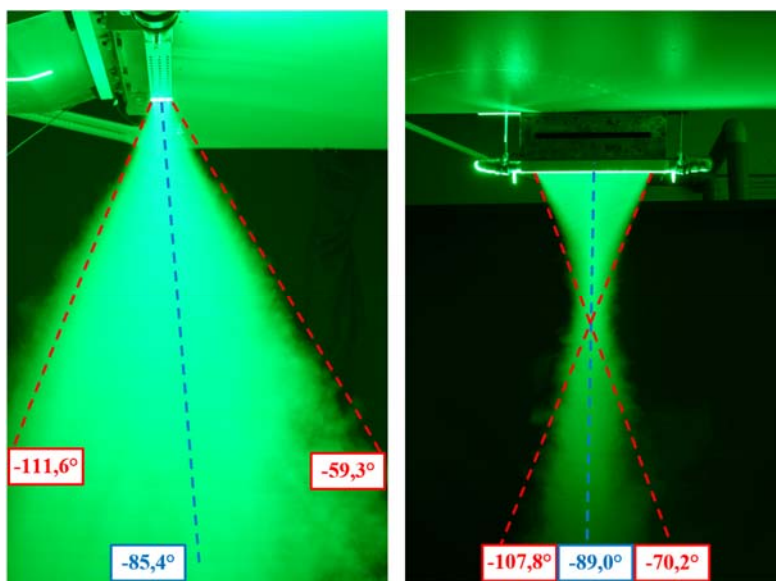
Obr. 3.1 – Vizualizace proudu vzduchu z přívodní štěrbin

Proud se v této rovině mírně rozšiřuje v průměru o  $8,6^\circ$ . Odklon proudu přiváděného vzduchu vpravo (viz čelní pohled na obr. 3.1 vpravo) by bylo možné eliminovat např. symetrickým přívodem vzduchu ke štěrbině.

Přívodní proud vzduchu z **dírek** v rovině kolmé na přírubu jdoucí středem příruby (obr 3.2 vlevo) vykazuje velké průměrné rozšíření  $52,3^\circ$  způsobené krátkou trajektorií proudu (2 mm) rovným úsekem napříč materiálem základního profilu (čtvercový uzavřený profil  $30 \times 30 \times 2$  mm). Osa vystupujícího proudu je navíc skloněná o  $4,6^\circ$  k pracovnímu stolu.

V rovině rovnoběžné s přírubou jdoucí středem prostřední řady přiváděcích dírek (obr 3.2 vpravo) došlo oproti variantě se štěrbinou k výrazné změně, vzduch přiváděný do základního profilu z obou stran v tomto případě nezpůsobil

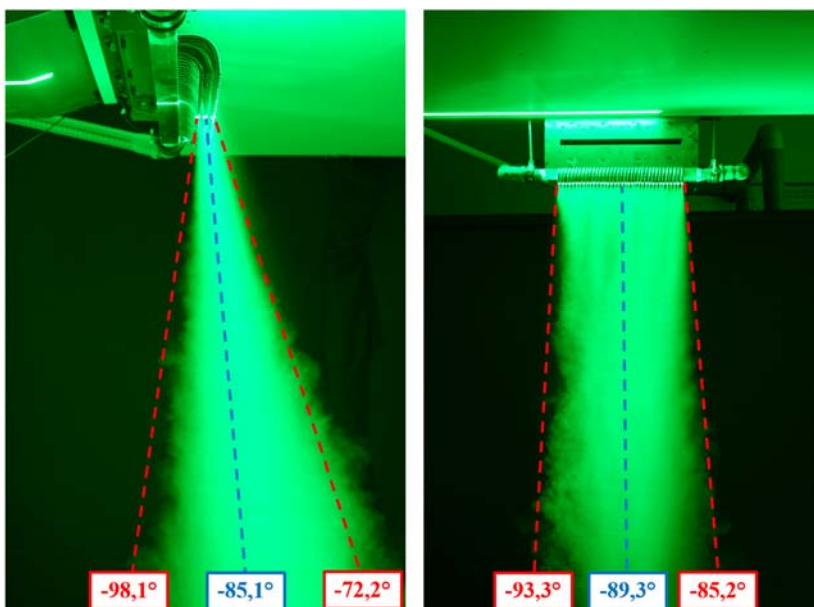
zrovnoměrnění proudění a nezamezil odchylování proudu do strany, ale kvůli absenci dráhy pro usměrnění proudu v požadovaném směru (pouze 2 mm v nosném materiálu základního profilu), dochází k odklonu proudu ve směru od přívodů, takže se vytvořilo proudění ve tvaru trojúhelníku. Tomuto jevu ještě více napomáhá, že jednotlivé proudy z dírek jsou k sobě navzájem přitahovány, protože si nemají v oblasti dírek odkud nasávat vzduch, přičemž na okrajích proudu dochází ke strhávání vzduchu z okolí. Celkově se však dle teorie má proud ve směru proudění rozšiřovat, a proto se (ve větší vzdálenosti) na obou snímcích (obr 3.2) proud rozšiřuje. Osa proudu jde téměř svisle dolů. Řešení s přívodem vzduchu dírkami je výrobně nenáročné, ale dle vizualizace při čelním pohledu nevhodné kvůli tvaru výstupního proudu, který nepokrývá celou oblast nad přírubou.



Obr. 3.2 – Vizualizace proudu vzduchu z přivodních dírek

Přívodní proud vzduchu z **trubiček** v rovině kolmé na přírubu jdoucí středem příruby (obr 3.3 vlevo) má průměrné rozšíření ( $25,9^\circ$ ), menší v porovnání s přívodem vzduchu štěrbinou. Navíc se osa vystupujícího proudu průměrně sklání o  $4,9^\circ$  k pracovnímu stolu.

V rovině rovnoběžné s přírubou jdoucí středem prostřední řady přiváděcích trubiček (obr 3.3 vpravo) došlo oproti variantě se štěrbinou k narovnání proudu a v porovnání s variantou s dírkami již nedochází k tvorbě zúžení a opětovného rozšíření proudu,



Obr. 3.3 – Vizualizace proudu vzduchu z přivodních trubiček

jelikož do prostoru mezi trubičkami se může přisávat vzduch, což brání vzájemnému přitahování proudů z jednotlivých trubiček. Také vzduch proudící trubičkami dostal na větší dráze jasný směr proudění. Proud má v této rovině průměrné rozšíření (8,1°) srovnatelné se štěrbinou (8,6°). Řešení s přívodem vzduchu trubičkami je výrobně náročné, ale dle vizualizace při čelním pohledu má požadovaný tvar.

## 4 MĚŘENÍ ÚČINNOSTI ODSÁVÁNÍ ŠTĚRBINOVÉHO SACÍHO NÁSTAVCE

Pro měření účinnosti odsávání byla použita metoda stopového plynu. Tato metoda spočívá v zavádění vhodného stopového plynu pomocí porézní kuličky (všesměrového) do zvoleného místa před sacím nástavcem. Porézní kulička je umístována do měřicích bodů na zvolené síti v měřené rovině. Pro každý bod této měřené roviny jsou pro konfiguraci 1. – 3. z tab.2.1 (str. 11) odebírány vzorky vzduchu pomocí přepínače měřicích míst, a to z okolního vzduchu v místnosti a z odsávacího potrubí za vířičem, který je použit pro homogenizování odsátého stopového plynu v potrubí společně s odsátým vzduchem. Vzorky vzduchu jsou analyzovány pomocí Multigas monitoru Type 1302 od firmy Brüel & Kjær.

Pro konfiguraci 4. – 9. z tab.2.1 (str. 11) jsou pro každý bod měřené roviny odebírány vzorky vzduchu z odsávacího potrubí za vířičem a analyzovány pomocí Multigas monitoru Type 1302 od firmy Brüel & Kjær. Současně je pomocí multifunkčního měřicího přístroje Testo 435 se sondou IAQ kontinuálně měřena koncentrace stopového plynu v místnosti tzv. na pozadí. Měření každého bodu je zdlouhavé, jelikož je potřeba po přesunutí zdroje škodliviny ustálit proudění. Následně se může provést měření koncentrace stopového plynu v odsávaném vzduchu, a to vždy alespoň 3x a před každým měřením se také proplachují trubičky a měřicí komora novým vzorkem vzduchu, aby v ní nezůstaly rezidua z předchozího měření.

Účinnost odsávání v daném bodě je poté možné vypočítat ze vztahu dle (Pedersen a Nielsen 1991; ČSN\_EN\_1093-4+A1 2008), který je upraven na výpočet s průměrnými hodnotami kvůli opakovanému měření v každém bodě:

$$\eta = \frac{\bar{C}_{od} - \bar{C}_{poz}}{\bar{C}_{od,ref} - \bar{C}_{poz,ref}}, \quad (4.1)$$

kde:

$\eta$	[1]	– účinnost odsávání škodlivin,
$\bar{C}_{od}$	[ppm]	– průměrná koncentrace stopového plynu v odsávaném vzduchu,
$\bar{C}_{poz}$	[ppm]	– průměrná koncentrace stopového plynu na pozadí,
$\bar{C}_{od,ref}$	[ppm]	– průměrná koncentrace odpovídající zachycení 100 % stopového plynu při referenčním měření,
$\bar{C}_{poz,ref}$	[ppm]	– průměrná koncentrace stopového plynu na pozadí při referenčním měření.

Referenční koncentrace je určována vždy před začátkem měření s využitím papírového trychtýře, který je užší částí vložen do odsávací štěrbině a do rozšiřující se části je vložen zdroj stopového plynu (porézní kulička). Poté je opakovaně měřena koncentrace stopového plynu v odsávaném vzduchu (v němž je zachycen všechny stopový plyn) a dále se měří koncentrace stopového plynu na pozadí.

Výsledky měření účinnosti odsávání jsou poté vizualizovány pomocí softwaru Surfer od firmy Golden Software. V Surferu je z naměřených dat vytvořena pravidelná síť uzlových bodů metodou Kriging. Tato metoda patří mezi nejflexibilnější a nejpřesnější metody transformace prostorově orientovaných dat s lineárním variogramem a je vhodná pro většinu dat.

Pro popis chování stopového plynu – škodliviny ve vzduchu bylo využito Archimedovo číslo, které dává informaci o stupni neizotermičnosti proudu, nebo v uvedeném případě rozdílné hustotě proudu vůči hustotě okolního plynu a je vyjádřeno poměrem sil vztlakových k silám setrvačným, působících na částice plynu.

$$A_r = \frac{g \cdot \Delta\rho \cdot L}{\rho_\infty \cdot w^2}, \quad (4.2)$$

kde:

$A_r$	[1]	– Archimedovo číslo,
$g$	[m·s <sup>-2</sup> ]	– tíhové zrychlení,
$\Delta\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	– rozdíl hustoty škodliviny a hustoty vzduchu,
$\rho_\infty$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	– hustota vzduchu,
$L$	[m]	– charakteristický rozměr výustky,
$w$	[m·s <sup>-1</sup> ]	– rychlost proudění.

V případě odsávání je výhodné mít informaci o směru výslednice sil působících na odsávaný plyn. Pokud tíhové zrychlení v souřadném systému směřuje proti směru osy  $z$ , bude kladné Archimedovo číslo označovat plyn pohybující se ve směru osy  $z$  (stoupající přirozené proudy) a naopak bude-li Archimedovo číslo záporné, bude se plyn pohybovat proti směru osy  $z$  tj. ve směru tíhové zrychlení.

Např. pro vzduchotechnické výustky při přívodu teplého nebo studeného vzduchu do místnosti při  $|A_r| \leq 0,001$  jde o proud mírně neizotermní a silně neizotermní při  $|A_r| > 0,01$ . Nejvýraznějším účinkem vztlakových sil je vertikální ohyb proudu. U proudů s malým rozdílem hustot lze předpokládat, že se v prostoru osy proudů šíří přímočaře, obdobně jako izotermní proudy vzduchu z příváděcích vzduchotechnických výustek (Janotková 1991).

Použitý stopový plyn – CO<sub>2</sub> má větší hustotu oproti vzduchu, a i když je přiváděn v relativně malém množství na výstupu z všesměrového zdroje se ihned nepromíchá s okolním vzduchem, ale postupně padá ve směru gravitace. Bylo by tedy výhodné použít jako stopový plyn helium, které má menší hustotu, avšak použitý analyzátor plynů nedisponuje filtrem pro měření koncentrace helia. Z tohoto důvodu byl opět použit oxid uhličitý jako stopový plyn a bylo přistoupeno k měření účinnosti odsávání zesíleného sacího nástavce v konfiguracích 4. – 9. z tab.2.1 (str. 11) tj. s přepážkou nad odsávací šterbinou. Toto uspořádání modeluje pracovní stůl se, škodlivinou lehčí než vzduch (s kladným Archimedovým číslem).

Pro výpočet hustoty stopového plynu vůči pracovnímu stolu je využito rovnice pro výslednou vztlakovou sílu na jednotku objemu vycházející z Archimedova zákona:

$$G = |g| \cdot (\rho_\infty - \rho_{CO_2}), \quad (4.3)$$

kde:

$G$	[N·m <sup>-3</sup> ]	– výsledná vztlaková síla na jednotku objemu,
$g$	[m·s <sup>-2</sup> ]	– tíhové zrychlení (9,80665 m·s <sup>-2</sup> ),
$\rho_{CO_2}$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	– hustota stopového plynu,
$\rho_\infty$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	– hustota vzduchu.

Po dosazení vypočítaných hustot (pro průměrné podmínky při měření) do rov. (4.3) je poté vztlaková síla na jednotku objemu pro CO<sub>2</sub> ve vzduchu  $-6,59 \text{ N}\cdot\text{m}^{-3}$  (při stejné teplotě CO<sub>2</sub> a vzduchu).

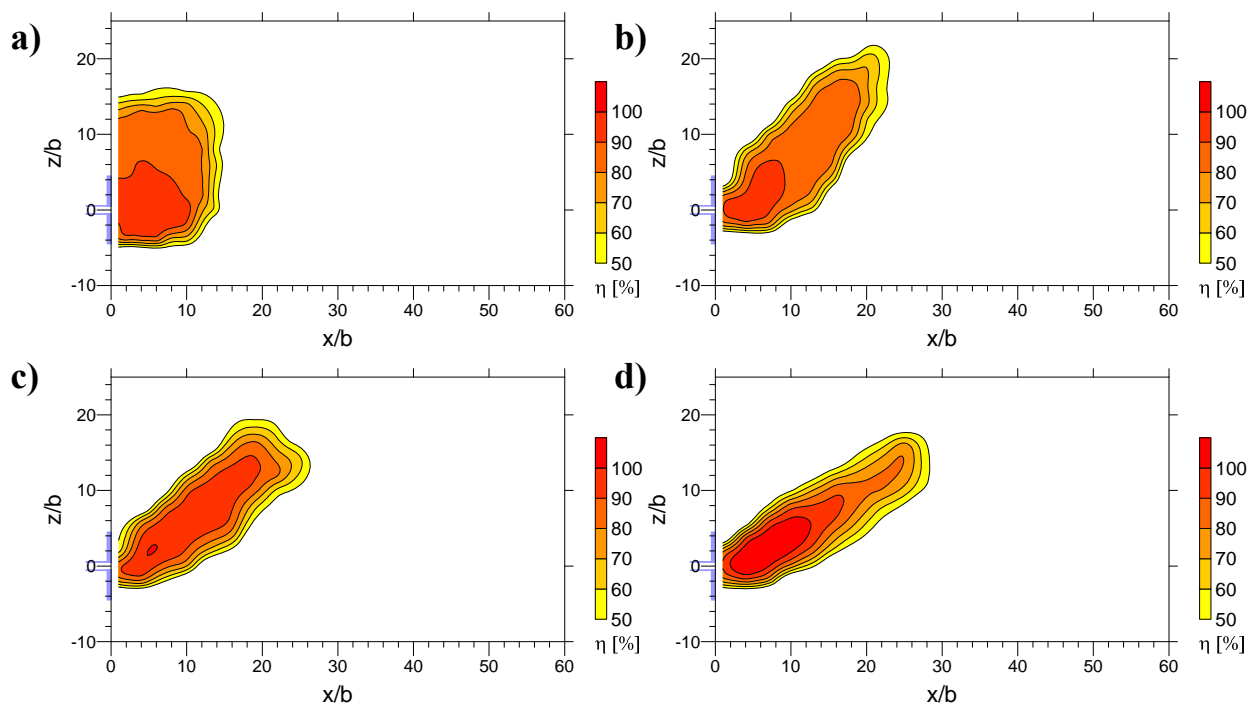
Vůči přepážce nad odsávací šterbinou bude tato výslednice působit opačným směrem, takže bude mít hodnotu  $6,59 \text{ N}\cdot\text{m}^{-3}$ . Nyní je již možné dosazením do rov. (4.3) vypočítat hustotu CO<sub>2</sub> vůči přepážce nad odsávací šterbinou, která je  $0,62 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (při normálních fyzikálních podmínkách). Pro srovnání stejnou hustotu bude mít vzduch při teplotě 569 °C.

Z rovnice (4.2) je možné určit Archimedovo číslo. Pro použitý stopový plyn  $\text{CO}_2$  a přepážku pod sacím nástavcem je Archimedovo číslo pro průměrné podmínky při měření  $Ar_{\text{CO}_2, \text{přepážka pod}} = -0,0012$  a vůči přepážce nad odsávací štěrbinou  $Ar_{\text{přepážka nad}} = 0,0012$ . Dále pro  $\text{SF}_6$  je Archimedovo číslo  $Ar_{\text{SF}_6, \text{přepážka pod}} = -0,0093$  a pro helium  $Ar_{\text{He, přepážka pod}} = 0,0020$ . V případě odsávání je vliv hustoty výrazný i při Archimedově čísle blízkém hodnotě 0,001. Ale pokud by šlo o přívod vzduchu jednalo by se pouze o mírně neizotermní proud, který by se v prostoru šířil téměř přímočaře.

## 4.1 Výsledky účinnosti odsávání ve volném prostoru – přívod dvěma štěrbinami

Uvedené měření bylo provedeno Bouzkem (Bouzek 2004) na Energetickém ústavu, FSI, VUT v Brně se sacím nástavcem umístěným ve volném prostoru. Výsledky jsou zde uvedeny z důvodu návaznosti dizertační práce na předchozí výzkumy pracoviště, pro možnost porovnání účinnosti odsávání zesíleného štěrbinového nástavce ve volném prostoru a s pracovním stolem – přepážkou.

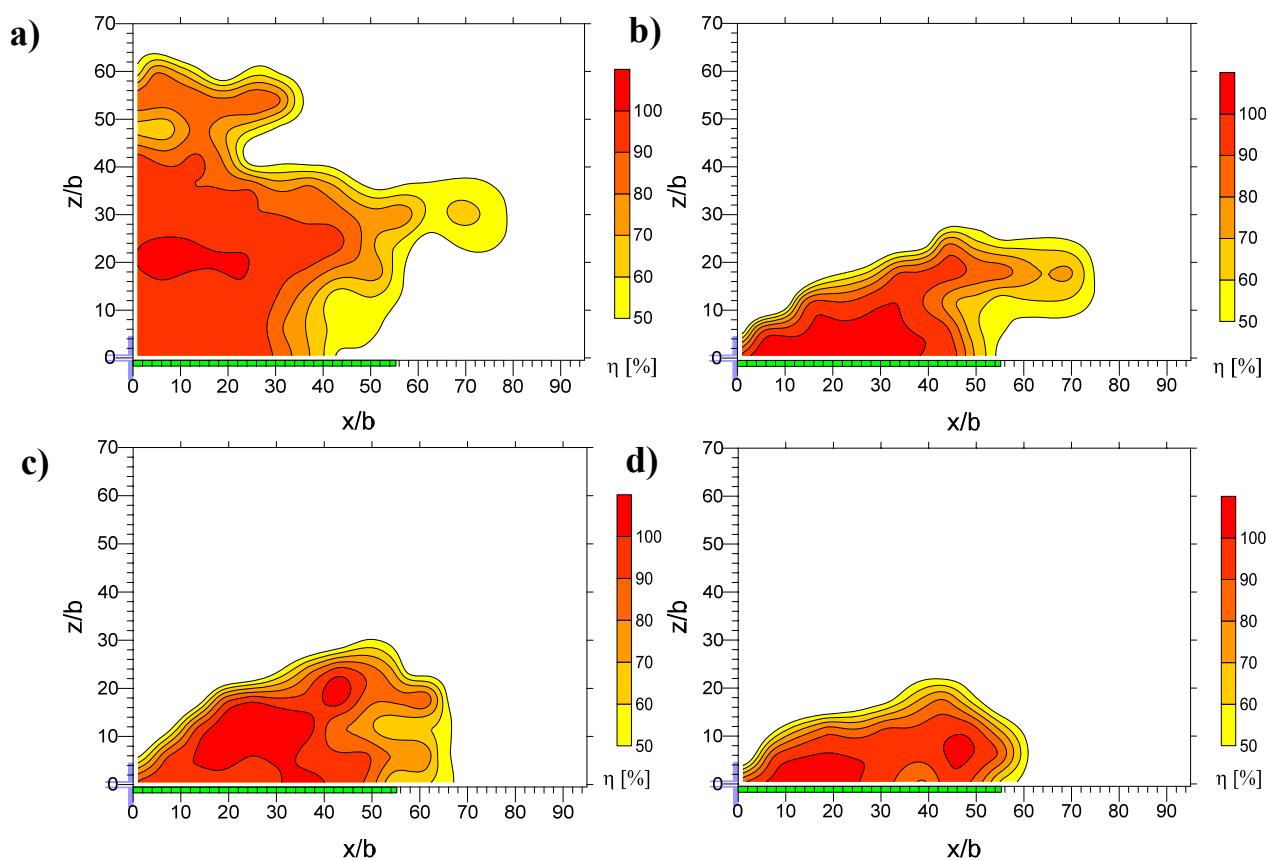
Výsledné plochy účinného odsávání při různých módech sacího nástavce ( $I = 0$ ;  $I = 0,3$ ;  $I = 0,6$  a  $I = 0,9$ ) jsou zobrazeny na obr. 4.1. Při porovnání výsledků měření lze vidět, že při odsávání s pracovním parametrem  $I = 0$  (tradiční odsávání bez zesílení) je oblast účinného odsávání širší, ale za to kratší ( $x/b = 14,9$ ) v porovnání s ostatními měřenými případy. Při zvyšování hodnoty pracovního parametru  $I$  se plocha účinného odsávání prodlužuje (pro  $I = 0,3$   $x/b = 23,0$ ;  $I = 0,6$   $x/b = 26,3$  a  $I = 0,9$   $x/b = 28,3$ ) a postupně narovnává, ale současně dochází k zúžení této plochy. Lze také vidět značnou asymetrii oblasti účinného odsávání vůči horizontální ose sacího nástavce. Tato asymetrie je způsobena rozdílnou hustotou použitého stopového plynu  $\text{CO}_2$  a hustotou vzduchu, které jsou  $1,726 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a  $1,135 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , při průměrné teplotě a tlaku během měření. Archimedovo číslo v tomto případě má hodnotu  $Ar = -0,0012$ , tj. stopový plyn klesá proti směru osy  $z$ .



Obr. 4.1 – Účinnost zachycení škodlivin ve vertikální rovině jdoucí osou sacího nástavce umístěného ve volném prostoru – přívod dvěma štěrbinami s pracovním parametrem: **a)**  $I = 0$ ; **b)**  $I = 0,3$ ; **c)**  $I = 0,6$ ; **d)**  $I = 0,9$  převzato a upraveno (Bouzek 2004)

## 4.2 Výsledky měření účinnosti odsávání s pracovním stolem v úrovni spodní hrany odsávací štěrbinou – přívod štěrbinou

Obr. 4.2 ilustruje použití zesíleného štěrbinového sacího nástavce v kombinaci s pracovním stolem – přepážkou umístěným v úrovni spodní hrany odsávací štěrbinou. Z porovnání výsledků je patrný značný rozdíl výšky plochy účinného odsávání při tradičním odsávání  $I = 0$ . Při zvyšování pracovního parametru  $I$  dochází k prodlužování oblasti vysoce účinného odsávání s 80% a vyšší účinností, ale také ke zmenšování její výšky způsobené přívodním proudem, který ve větší výšce nad pracovním stolem strhává vzduch se stopovým plynem a tím jej recirkuluje zpět do místnosti. Maximální dosah odsávání je při  $I = 0$   $x/b = 78,6$ ;  $I = 0,3$   $x/b = 74,9$ ;  $I = 0,6$   $x/b = 67,2$  a pro  $I = 0,9$   $x/b = 60,9$ . Při zvětšujícím se pracovním parametru  $I$  sice dochází ke zkracování celkové zachytné vzdálenosti ale zvyšuje se účinnost v pracovní oblasti.

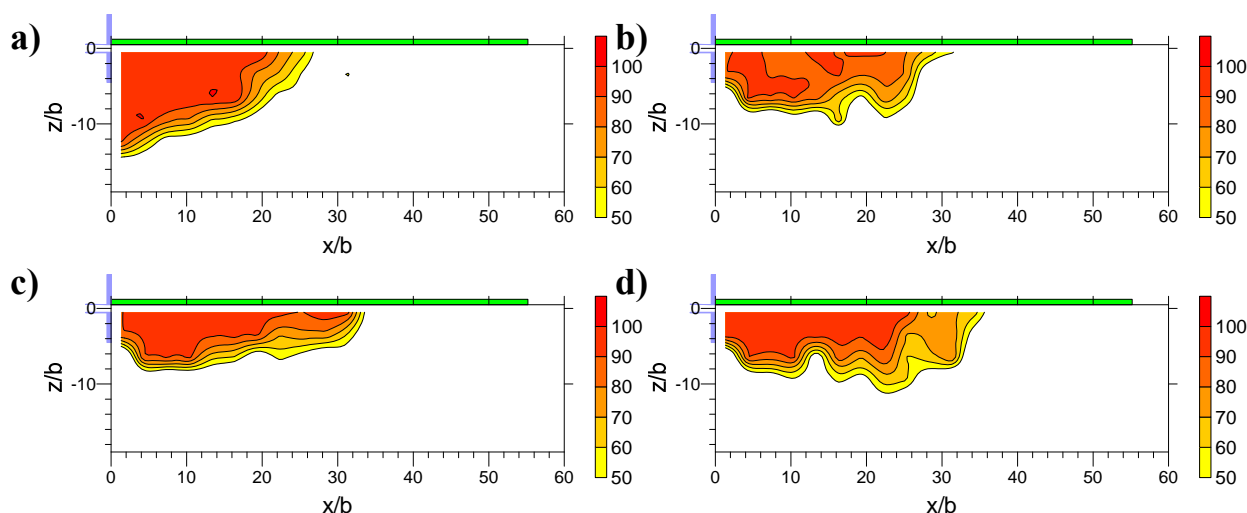


Obr. 4.2 – Účinnost zachycení škodlivin ve vertikální rovině jdoucí osou sacího nástavce s pracovním stolem – přepážkou v úrovni spodní hrany odsávací štěrbinou – přívod štěrbinou s pracovním parametrem: a)  $I = 0$ ; b)  $I = 0,3$ ; c)  $I = 0,6$ ; d)  $I = 0,9$

## 4.3 Výsledky měření účinnosti odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbinou – přívod štěrbinou

Při použití konfigurace 5. (z tab.2.1 na str. 11) se zesíleným sacím nástavcem s přívodem vzduchu štěrbinou a s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbinou bylo využito záporného Archimedova čísla použitého stopového plynu a přepážka byla přesunuta nad odsávací štěrbinu. Toto uspořádání modeluje pracovní stůl se, škodlivinou lehčí než vzduch (s kladným Archimedovým číslem).

Z výsledků (obr. 4.3) je patrné, že se díky poloze přepážky nad odsávací štěrbinou výška účinné oblasti podstatně zmenšila a také došlo k jejímu zkrácení v porovnání s konfigurací s přepážkou pod sacím nástavcem. Dále je možné vidět, že oblast účinného odsávání při tradičním odsávání ( $I = 0$ ) dosahuje větší vzdálenosti od přepážky (ve směru  $-z$ ), protože neobsahuje žádný přívodní proud, který by v této oblasti mohl stopový plyn strhnout a recirkulovat do místnosti. Ale při použití zesíleného odsávání ( $I = 0,3; 0,6$  a  $0,9$ ) došlo k prodloužení účinné oblasti. Maximální dosah odsávání je při  $I = 0$   $x/b = 26,8$ ;  $I = 0,3$   $x/b = 31,6$ ;  $I = 0,6$   $x/b = 33,6$  a pro  $I = 0,9$   $x/b = 35,6$ .

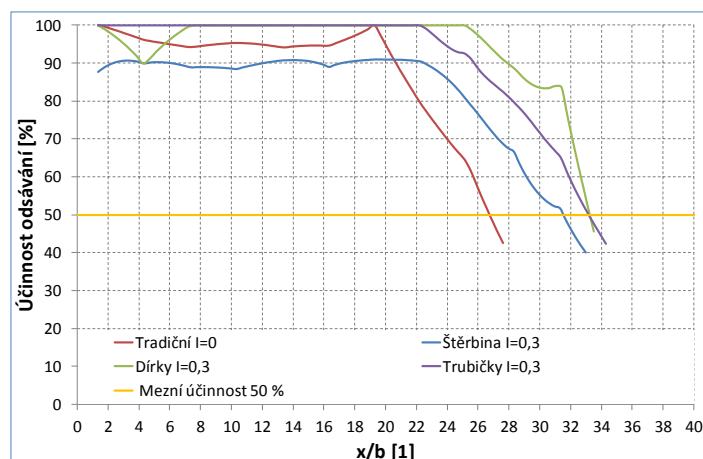


Obr. 4.3 – Účinnost zachycení škodlivin ve vertikální rovině jdoucí osou sacího nástavce s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbiny – přívod štěrbinou s pracovním parametrem: a)  $I = 0$ ; b)  $I = 0,3$ ; c)  $I = 0,6$ ; d)  $I = 0,9$

#### 4.4 Porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrbiny s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbiny

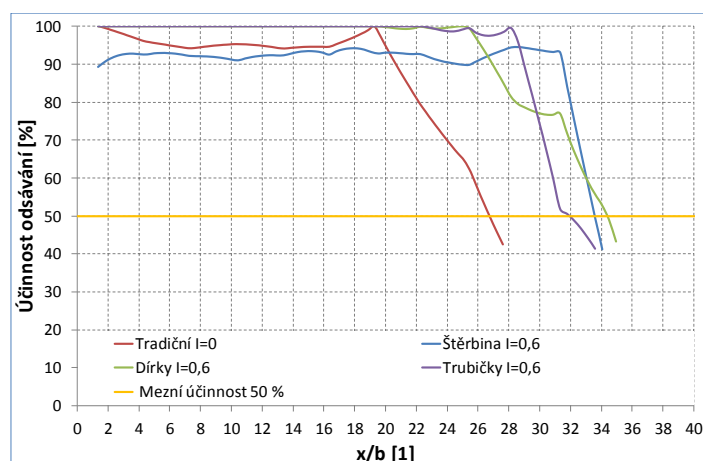
Výsledky porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrbiny tradičního a zesíleného štěrbinového sacího nástavce v konfiguraci s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbiny, při použití jednotlivých typů přívodu vzduchu (štěrbinou, dírkami, trubičkami) a pro pracovní parametry  $I = 0,3; 0,6$  a  $0,9$  jsou uvedeny v obr. 4.4, obr. 4.5 a obr. 4.6.

Při nastavení pracovního parametru na hodnotu  $I = 0,3$  lze pozorovat větší účinnosti odsávání oproti tradičnímu sacímu nástavci u zesíleného odsávání s přívodem vzduchu dírkami a trubičkami. U všech variant zesíleného odsávání došlo také k prodloužení oblasti vysoce účinného odsávání s 80% a vyšší účinností z  $x/b = 22,2$  u tradičního odsávání na  $x/b = 25,3$  u přívodu štěrbinou, u přívodu trubičkami  $x/b = 28,3$  a při použití dírek pro přívod vzduchu na  $x/b = 31,6$ . Oblast účinného odsávání v ose odsávací štěrbiny se prodloužila z  $x/b = 26,7$  u tradičního odsávání na  $x/b = 31,6$  při použití štěrbinou,  $x/b = 33,1$  při využití trubiček a  $x/b = 33,2$  při použití dírek pro přívod vzduchu.



Obr. 4.4 – Porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrbině s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbině s pracovním parametrem  $I = 0$  a  $0,3$

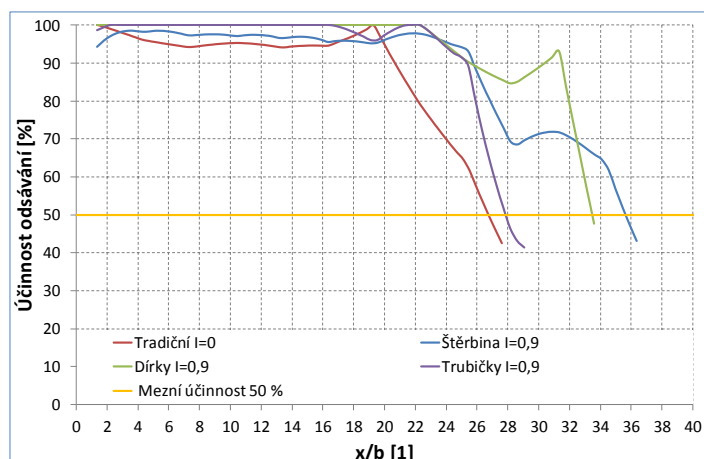
Při nastaveném pracovním parametru na hodnotu  $I = 0,6$  je nejvyšších účinností odsávání na největší vzdálenosti dosahováno s přívodem vzduchu trubičkami a dírkami. Oproti tradičnímu odsávání ( $x/b = 22,2$ ) se oblast vysoce účinného odsávání prodloužila na  $x/b = 28,5$  při použití dírek,  $x/b = 29,6$  u přívodu trubičkami a  $x/b = 32,0$  u přívodu vzduchu štěrbinou. Oblast účinného odsávání v ose odsávací štěrbině je oproti tradičnímu odsávání ( $x/b = 26,7$ ) vždy delší, a to při použití trubiček ( $x/b = 32,0$ ), při využití štěrbin ( $x/b = 33,6$ ) a při použití dírek ( $x/b = 34,4$ ) pro přívod vzduchu. V porovnání s nastavením pracovního parametru na  $I = 0,3$  došlo ke zkrácení účinné oblasti u přívodu vzduchu trubičkami a k prodloužení při přívodu vzduchu štěrbinou a dírkami.



Obr. 4.5 – Porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrbině s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbině s pracovním parametrem  $I = 0$  a  $0,6$

Zvýšením pracovního parametru na hodnotu  $I = 0,9$  došlo ke zvýšení účinnosti odsávání u varianty s přívodem vzduchu štěrbinou. Délka oblasti vysoce účinného odsávání oproti tradičnímu odsávání ( $x/b = 22,2$ ) se nejvíce zkrátila u přívodu vzduchu trubičkami na hodnotu  $x/b = 25,9$ . Při použití štěrbin pro přívod vzduchu je  $x/b = 26,8$  a při použití dírek  $x/b = 32,0$ .

Oblast účinného odsávání v ose odsávací štěrbině je u všech typů přívodu větší než při tradičním odsávání ( $x/b = 26,7$ ) avšak při přívodu vzduchu trubičkami ( $x/b = 27,8$ ) a dírkami ( $x/b = 33,5$ ) došlo k poklesu délky oblasti účinného odsávání v ose odsávací štěrbině oproti nastavení pracovního parametru na  $I = 0,6$ . U přívodu vzduchu štěrbinou došlo k nárůstu dosahu odsávání na hodnotu  $x/b = 35,6$ .



Obr. 4.6 – Porovnání účinnosti odsávání v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby s pracovním parametrem  $I = 0$  a  $0,9$

Celkově bylo dosahováno vyšší účinnosti odsávání v ose odsávací štěrby s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrby, pokud bylo využito pro přívod vzduchu dírek a trubiček. Nejdlejší oblasti vysoce účinného odsávání s 80% a vyšší účinností bylo dosahováno při použití dírek pro přívod vzduchu a to ve dvou ze tří nastavení pracovního parametru. A nejdlejší oblasti účinného odsávání bylo dosaženo při pracovním parametru  $I = 0,9$  a použití štěrby pro přívod vzduchu.

## 5 MĚŘENÍ RYCHLOSTNÍCH POLÍ ŠTĚRBINOVÉHO SACÍHO NÁSTAVCE

Rychlostní pole ve sledované části prostoru bylo měřeno soustavou termo-anemometrických sond ve formě žhavených NTC<sup>6</sup> kuliček (pro potlačení fluktuací proudění) s průměrem 3 mm a časovou konstantou 4 s, připojených do dvou datalogerů Testo 454 ovládaných kontrolní jednotkou Testo 350 M/XL. Jelikož žhavené kuličky nejsou prakticky směrově závislé (proud by hlavně neměl přicházet ze strany držáku), jedná se o měření absolutních rychlostí. Předností termo-anemometrů jsou relativně malé rozměry sond, které příliš nenarušují rychlostní pole.

Díky 6 resp. 8 sondám je možné získat poměrně přesný popis rychlostního pole proudícího vzduchu, které je možné porovnat s polem účinnosti odsávání a poté může sloužit jako rychlejší alternativa k měření metodou stopového plynu.

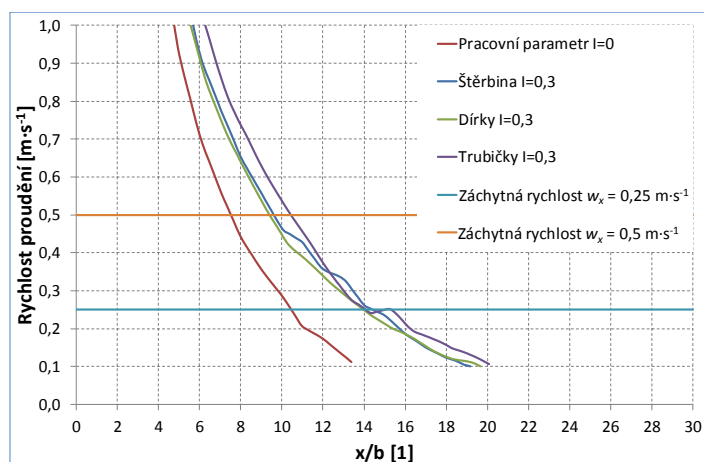
Vzhledem k povaze škodlivin a pohybu vzduchu v místnosti, rychlost proudu směřujícího do sacího otvoru musí být vyšší než minimální rychlost, která je známá jako záchytná rychlost (capture velocity). Dle literatury jsou používány dvě záchytné rychlosti a to  $w_x = 0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $w_x = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Autoři Høgsted (Høgsted 1987), Hunt a Ingram (Hunt a Ingram 1992), Saunders a Fletcher (Saunders a Fletcher 1993), postupně definovali tzv. účinnou oblast odsávání, ze které je vzduch se škodlivinami odsán z pracovního prostoru do sacího otvoru, okraje této oblasti jsou definovány izotachou záchytné rychlosti. Směr záchytné rychlosti je také důležitý, ale použitou metodou měření jej není možné určit, proto je větší zájem věnován porovnání rychlostí v ose štěrby, které tomuto požadavku vyhovují.

<sup>6</sup> NTC - negative temperature coefficient – s rostoucí teplotou klesá odpor

## 5.1 Porovnání rychlostí v ose odsávací štěrbiny s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbiny

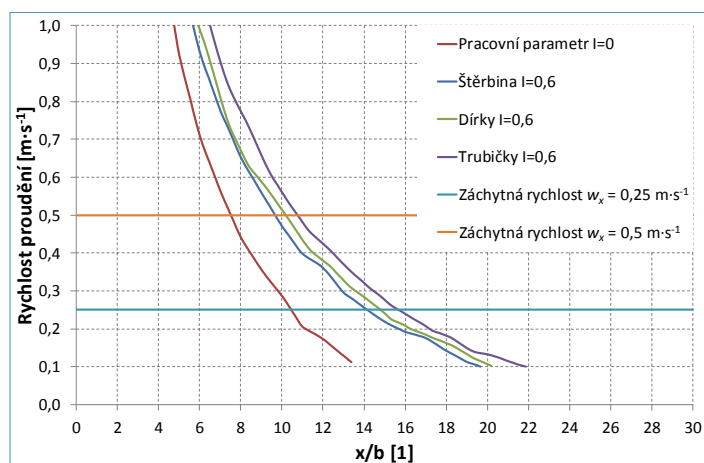
Výsledky porovnání rychlostí v ose odsávací štěrbiny tradičního a zesíleného štěrbinového sacího nástavce v konfiguraci s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbiny, při použití jednotlivých typů přívodu vzduchu (štěrbinou, dírkami, trubičkami) a pro pracovní parametry  $I = 0,3$ ;  $0,6$  a  $0,9$  lze nalézt v obr. 5.1, obr. 5.2 a obr. 5.3.

Při nastavení pracovního parametru na hodnotu  $I = 0,3$  lze pozorovat větší dosah oblasti účinného odsávání oproti tradičnímu sacímu nástavci u všech použitých variant zesíleného odsávání pro obě zkoumané záchytné rychlosti ( $w_x = 0,25$  a  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). U tradičního odsávání je dosah účinné oblasti  $x/b = 10,5$  resp.  $7,5$ ; při přívodu vzduchu štěrbinou se prodloužil na  $x/b = 14,4$  resp.  $9,6$ ; u přívodu dírkami došlo k prodloužení na  $x/b = 14,0$  resp.  $9,4$  a při použití trubiček pro přívod vzduchu na  $x/b = 15,3$  resp.  $10,4$ .



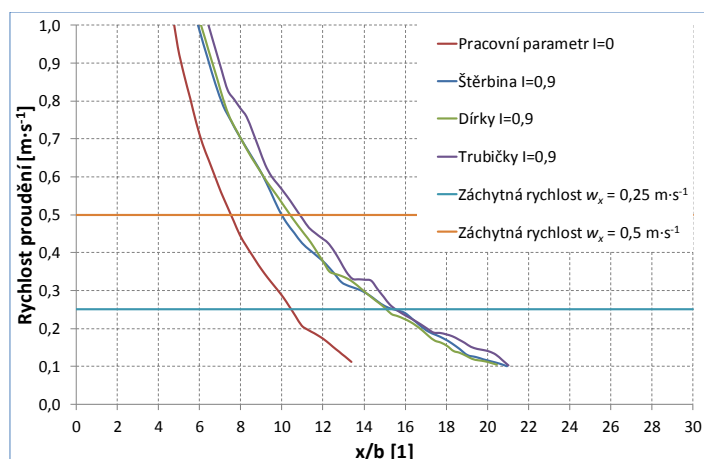
Obr. 5.1 – Porovnání rychlostí proudění v ose odsávací štěrbiny s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbiny s pracovním parametrem  $I = 0$  a  $0,3$

Nastavením pracovního parametru na hodnotu  $I = 0,6$  se opět více projeví rozdíly mezi jednotlivými typy přívodu vzduchu. U tradičního odsávání je dosah účinné oblasti  $x/b = 10,5$  resp.  $7,5$ ; při přívodu vzduchu štěrbinou se prodloužil na  $x/b = 14,2$  resp.  $9,7$ ; u přívodu dírkami došlo k prodloužení na  $x/b = 14,8$  resp.  $10,2$  a při použití trubiček pro přívod vzduchu na  $x/b = 15,7$  resp.  $10,8$ . V porovnání s nastavením pracovního parametru na  $I = 0,3$  se všechny dosahy prodloužily kromě varianty s přívodem vzduchu štěrbinou, kdy došlo u záchytné rychlosti  $w_x = 0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  k malému poklesu této vzdálenosti.



Obr. 5.2 – Porovnání rychlostí proudění v ose odsávací štěrbiny s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbiny s pracovním parametrem  $I = 0$  a  $0,6$

Dalším zvýšením pracovního parametru na hodnotu  $I = 0,9$  došlo u všech variant zesíleného odsávání k dalšímu mírnému prodloužení účinné oblasti v ose odsávací štěrbinou pro obě záchytné rychlosti ( $w_x = 0,25$  a  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). U tradičního odsávání je dosah účinné oblasti  $x/b = 10,5$  resp.  $7,5$ ; při přívodu vzduchu štěrbinou se prodloužil na  $x/b = 15,5$  resp.  $10,0$ ; u přívodu dírkami došlo k prodloužení na  $x/b = 15,1$  resp.  $10,4$  a při použití trubiček pro přívod vzduchu  $x/b = 15,7$  resp.  $10,9$ . Lze pozorovat, že u varianty s přívodem vzduchu trubičkami již nedošlo k téměř žádnému nárůstu záchytné vzdálenosti v porovnání s nastavením pracovního parametru na  $I = 0,6$  ale při přívodu vzduchu štěrbinou došlo u záchytné rychlosti  $w_x = 0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  k největšímu prodloužení záchytné vzdálenosti. Avšak nejdelší záchytné vzdálenosti bylo dosaženo s přívodem vzduchu trubičkami.



Obr. 5.3 – Porovnání rychlostí proudění v ose odsávací štěrbinou s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbinou s pracovním parametrem  $I = 0$  a  $0,9$

Celkově bylo dosahováno nejlepších výsledků účinnosti odsávání v ose odsávací štěrbinou s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbinou, pokud bylo využito pro přívod vzduchu trubiček.

## 6 ENERGETICKÁ NÁROČNOST SACÍCH NÁSTAVCŮ

Pro porovnání energetické náročnosti sacích nástavců byl vypočítán ztrátový příkon nutný pro překonání tlakových ztrát a vytvoření potřebného dynamického tlaku vycházející z Bernoulliho rovnice integrované při uvažování izochorického<sup>7</sup> děje a rozšířené o ztráty při proudění, kterou lze psát ve tvaru:

$$\dot{V} \cdot [p_{1,c} - p_{2,c}] = P_z, \quad (6.1)$$

kde:

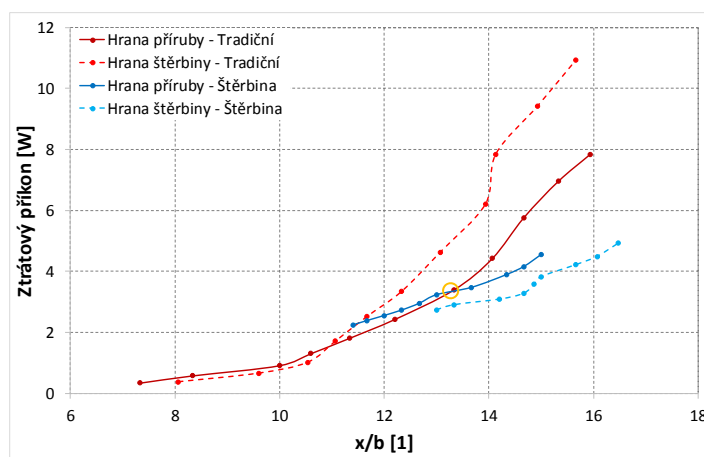
$\dot{V}$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	– objemový průtok
$P_z$	[J·s <sup>-1</sup> ]	– ztrátový příkon (příkon potřebný pro překonání ztrát v úseku mezi tlaky $p_{1,c}$ a $p_{2,c}$ ),
$p_{1,c}$	[Pa]	– celkový tlak v místě 1,
$p_{2,c}$	[Pa]	– celkový tlaky v místě 2.

Vyhodnocovaný ztrátový příkon je při tradičním odsávání a zesíleném odsávání s pracovním parametrem  $I = 0,6$  v závislosti na záchytné vzdálenosti v ose odsávací štěrbiny pro záchytnou rychlost  $w_x = 0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . V uvedených grafech jsou body pospojovány.

Porovnání vypočítaného ztrátového příkonu nutného (dle rov. (6.1)) pro překonání tlakových ztrát a vytvoření potřebného dynamického tlaku při tradičním odsávání a zesíleném odsávání s přívodem vzduchu štěrbinou v různých záchytných vzdálenostech v ose odsávací štěrbiny při záchytné rychlosti  $w_x = 0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  je uvedeno v obr. 6.1.

Z výsledků lze vidět, že při odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany příruby vykazuje tradiční odsávání do záchytné vzdálenosti  $x/b = 13,3$  nižší ztrátový příkon než zesílené odsávání s přívodem vzduchu štěrbinou. Při požadavku na delší záchytnou vzdálenost vykazuje již zesílené odsávání nižší ztrátový příkon.

Při odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbiny vykazuje zesílené odsávání s přívodem vzduchu štěrbinou v celém zkoumaném rozsahu záchytných vzdáleností nižší ztrátový příkon než tradiční odsávání.



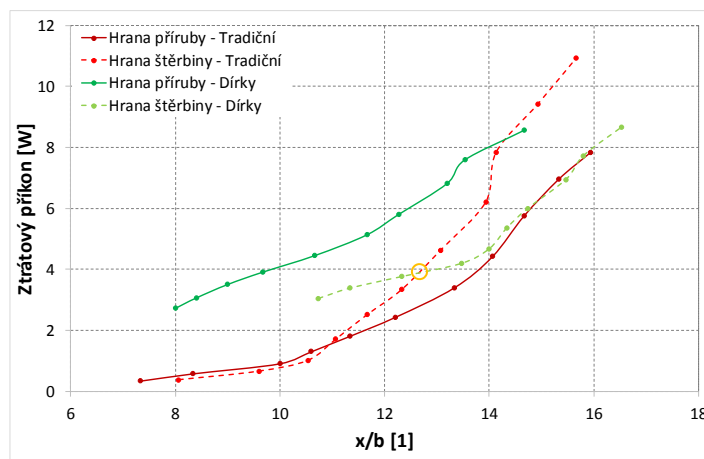
Obr. 6.1 – Závislost ztrátového příkonu sacího nástavce (Tradiční – Štěrbina) na poměrné záchytné vzdálenosti v ose odsávací štěrbiny pro záchytnou rychlost  $0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Výsledky vypočítaného ztrátového příkonu při tradičním odsávání a zesíleném odsávání s přívodem vzduchu dírkami v různých záchytných vzdálenostech v ose odsávací štěrbiny při záchytné rychlosti  $w_x = 0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  je uvedeno v obr. 6.2.

<sup>7</sup> Integraci je možné také provést při uvažování adiabatického děje. Pro rychlosti proudění do 0,3 rychlosti zvuku je však rozdíl ve výsledném ztrátovém příkonu minimální.

Z výsledků lze vidět, že při odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany příruby vykazuje tradiční odsávání v celém zkoumaném rozsahu záchytných vzdáleností nižší ztrátový příkon než zesílené odsávání s přívodem vzduchu dírkami.

Při odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbině vykazuje tradiční odsávání do záchytné vzdálenosti  $x/b = 12,7$  nižší ztrátový příkon než zesílené odsávání s přívodem vzduchu dírkami. Při požadavku na delší záchytnou vzdálenost vykazuje již zesílené odsávání nižší ztrátový příkon.

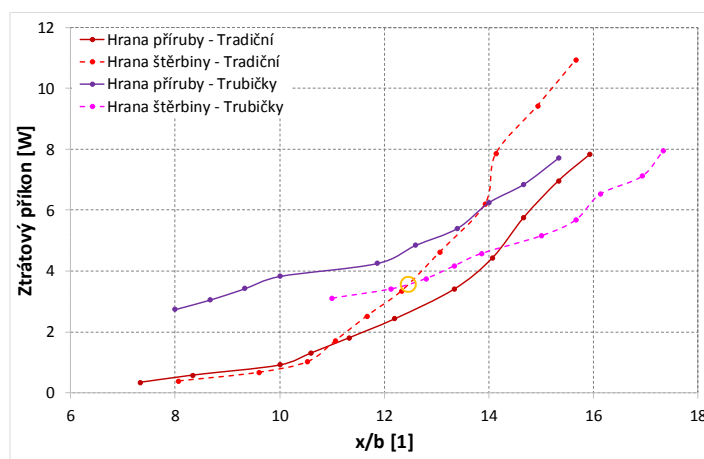


Obr. 6.2 – Závislost ztrátového příkonu sacího nástavce (Tradiční – Dírky) na poměrné záchytné vzdálenosti v ose odsávací štěrbině pro záchytnou rychlost  $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Porovnání vypočítaného ztrátového příkonu při tradičním odsávání a zesíleném odsávání s přívodem vzduchu trubičkami v různých záchytných vzdálenostech v ose odsávací štěrbině při záchytné rychlosti  $w_x = 0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  je uvedeno v obr. 6.3.

Je patrné, že při odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany příruby vykazuje tradiční odsávání v celém zkoumaném rozsahu záchytných vzdáleností nižší ztrátový příkon než zesílené odsávání s přívodem vzduchu trubičkami.

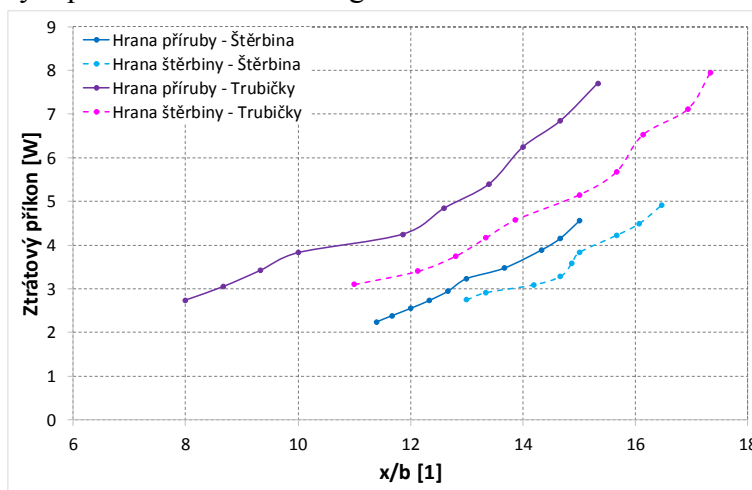
Při odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbině vykazuje tradiční odsávání do záchytné vzdálenosti  $x/b = 12,5$  nižší ztrátový příkon než zesílené odsávání s přívodem vzduchu trubičkami. Při požadavku na delší záchytnou vzdálenost vykazuje již zesílené odsávání nižší ztrátový příkon.



Obr. 6.3 – Závislost ztrátového příkonu sacího nástavce (Tradiční – Trubičky) na poměrné záchytné vzdálenosti v ose odsávací štěrbině pro záchytnou rychlost  $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Porovnání vypočítaného ztrátového příkonu při zesíleném odsávání s přívodem vzduchu štěrbinou a při zesíleném odsávání s přívodem vzduchu trubičkami v různých záchytných vzdálenostech v ose odsávací štěrbině při záchytné rychlosti  $w_x = 0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  je uvedeno v obr. 6.4.

Je patrné, že při odsávání s přepážkou v úrovni horní hrany příruby i v úrovni horní hrany odsávací šterbiny vykazuje zesílené odsávání s přívodem vzduchu šterbinou v celém zkoumaném rozsahu záchytných vzdáleností nižší příkon než zesílené odsávání s přívodem vzduchu trubičkami, což je způsobeno většími tlakovými ztrátami v přívodu vzduchu trubičkami. Turbulizací přiváděného vzduchu je ale dosaženo větších účinností odsávání v účinné oblasti. Je tedy třeba zvážit získané výhody v porovnání s větší energetickou náročností.



Obr. 6.4 – Závislost ztrátového příkonu sacího nástavce (Šterbina– Trubičky) na poměrné záchytné vzdálenosti v ose odsávací šterbiny pro záchytnou rychlost  $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Přívod vzduchu dírkami již s přívodem vzduchu šterbinou nebyl porovnán, protože z výsledků měření účinnosti sice vyšlo, že je účinnosti odsávání srovnatelná nebo v některých případech lepší oproti přívodu vzduchu trubičkami, ale z výsledků vizualizace proudění bylo patrné, že účinná oblast bude užší, než je šířka odsávací šterbiny, protože přívodní proud měl nevhodný tvar. Pokud by se provedly úpravy pro zrovnomnění proudění z přívodních dírek, došlo by k dalšímu zvětšení tlakových ztrát a tím zvětšení ztrátového příkonu.

## 7 NEJISTOTY MĚŘENÍ

Byl proveden rozbor jednotlivých nejistot měření:

- průměrné kombinované nejistoty měření teplot jsou pro:
  - teplotu vzduchu v odsávacím potrubí před průtokoměrem:  $\bar{\sigma}_{t_{1od,C}} = 0,183 \text{ K}$ ,
  - teplotu vzduchu v příváděcím potrubí před průtokoměrem:  $\bar{\sigma}_{t_{1př,C}} = 0,185 \text{ K}$ ,
  - teplotu přiváděného vzduchu v ústí šterbinové výustky:  $\bar{\sigma}_{t_{2př,C}} = 0,184 \text{ K}$ ,
  - teplotu okolí:  $\bar{\sigma}_{t_{ok,C}} = 0,187 \text{ K}$ .
- průměrná kombinovaná nejistota měření barometrického tlaku  $\bar{\sigma}_{p_b,C} = 50,1 \text{ Pa}$ ,
- průměrné kombinované nejistoty měření tlaku, jsou pro:
  - diferenční tlak v odsávací části nástavce:  $\bar{\sigma}_{\Delta p_{od,C}} = 2,3 \text{ Pa}$ ,
  - diferenční tlak v příváděcí části nástavce:  $\bar{\sigma}_{\Delta p_{př,C}} = 2,4 \text{ Pa}$ .
- průměrné kombinované nejistoty měření tlaku jsou pro:
  - podtlak vzduchu v odsávacím potrubí před průtokoměrem:  $\bar{\sigma}_{p_{1od,C}} = 8,7 \text{ Pa}$ ,
  - přetlak vzduchu v příváděcím potrubí před průtokoměrem:  $\bar{\sigma}_{p_{1př,C}} = 24,0 \text{ Pa}$ .
- průměrné kombinované nejistoty absolutního tlaku jsou pro:
  - absolutní tlak vzduchu v odsávacím potrubí před průtokoměrem:  $\bar{\sigma}_{p_{1aod,C}} = 50,9 \text{ Pa}$ ,
  - absolutní tlak vzduchu v příváděcím potrubí před průtokoměrem:  $\bar{\sigma}_{p_{1apř,C}} = 56,5 \text{ Pa}$ .
- průměrné kombinované nejistoty skutečného objemového průtoku vzduchu jsou pro:

- odsávaný vzduch:  $\bar{\sigma}_{\dot{V}_{1od,C}} = 3,655 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,
- přiváděný vzduch:  $\bar{\sigma}_{\dot{V}_{1př,C}} = 0,994 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .
- kombinované nejistoty měření rozměrů jsou pro:
  - šířku přiváděcí štěrbin:  $\sigma_{s,C} = 0,149 \text{ mm}$ ,
  - délku přiváděcí štěrbin:  $\sigma_{l_{př,C}} = 0,121 \text{ mm}$ ,
  - šířku odsávací štěrbin:  $\sigma_{b,C} = 0,117 \text{ mm}$ ,
  - délku odsávací štěrbin:  $\sigma_{l_{od,C}} = 0,107 \text{ mm}$ .
- průměrná kombinovaná nejistota nastavení pracovního parametru je  $\bar{\sigma}_{I,C} = 0,0383$ .
- průměrné kombinované nejistoty měření koncentrací jsou pro:
  - koncentraci stopového plynu v odsávaném vzduchu:  $\bar{C}_{od,C} = 43 \text{ ppm}$ ,
  - koncentraci stopového plynu v odsávaném vzduchu odpovídající zachycení 100 % stopového plynu při referenčním měření:  $\bar{C}_{od,ref,C} = 9 \text{ ppm}$ .
- průměrné kombinované nejistoty měření koncentrací jsou pro:
  - koncentraci stopového plynu na pozadí:  $\bar{C}_{poz,C} = 29 \text{ ppm}$ ,
  - koncentraci stopového plynu na pozadí při referenčním měření:  $\bar{C}_{poz,ref,C} = 29 \text{ ppm}$ .
- průměrná kombinovaná nejistota účinnosti odsávání je  $\bar{\sigma}_{\eta,C} = 14,3 \%$ .
- průměrná kombinovaná nejistota měření rychlosti proudění je  $\bar{\sigma}_{w,C} = 0,038 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .
- průměrné kombinované nejistoty měření příkonu jsou pro:
  - odsávací ventilátory  $\bar{\sigma}_{P_{od,C}} = 21,6 \text{ W}$ ,
  - přiváděcí ventilátor  $\bar{\sigma}_{P_{př,C}} = 9,9 \text{ W}$ .

## ZÁVĚR

Dizertační práce se zabývá experimentálním výzkumem lokálního odsávacího systému, a to zejména zesíleného odsávacího systému tzv. REEXS. Práce navazuje na předchozí výzkumy a rozšiřuje je o výzkum zesíleného odsávání s pracovním stolem – přepážkou a škodlivinou chovající se vůči přepážce jako lehčí než vzduch při použití různých typů přívodu vzduchu pro zesílení (štěrbin, soustava dírek, soustava trubiček).

Teoretická část práce se zabývá základním popisem větrání pomocí Navierových-Stokesových rovnic, ze kterých lze odvodit Archimedovo číslo (použité pro popis chování škodliviny ve vzduchu) a ztrátový příkon na výstcích. Dále jsou zde rozebrány větrací systémy a vše je směřováno k lokálnímu odsávání a sacím nástavcům, konkrétně obdélníkovým sacím nástavcům včetně základních výpočtů rychlostí v ose nástavců. Je zde také rozebrán vliv příruby na proudové pole před sacími nástavci.

Následuje obsáhlá literární rešerše zesíleného odsávacího systému seznamující s hlavními výsledky a závěry publikovaných prací. V této části je také uveden popis pracovního parametru  $I$  (poměr hybnostních toků přiváděného a odsávaného vzduchu) stanoveného Hyldgardem (Hyldgard 1987), který je využíván v celé této práci pro popis nastavení systému.

Dále je zde popsána použitá měřicí trať upravená na polo-automatizované měření, použité varianty zesíleného štěrbinového sacího nástavce s popisem úprav původního přívodu vzduchu pomocí štěrbin na přívod vzduchu pomocí soustavy dírek a soustavy trubiček pro zvýšení turbulizace přívodního proudu. Je zde uveden také popis měřených konfigurací zesíleného sacího nástavce ve volném prostoru (měřené Bouzkem (Bouzek 2004) a uvedené pro porovnání) a s pracovním stolem – přepážkou v různých polohách vůči sacímu nástavci. Následně uvádí popis měřicího systému včetně použitých vztahů, měření účinnosti metodou stopového plynu včetně výpočtu Archimedova čísla pro použitý stopový plyn. Dále je zde uveden popis měření rychlostních polí, vizualizaci kouřovou metodou, měření příkonu ventilátorů a měření tlakových ztrát.

Následuje popis vizualizace proudění, ve které byly pomocí kouřové metody vizualizovány přírodní proudy generované přírodní štěrbinou, soustavou dírek a soustavou trubiček. Přírodní štěrbinou generovala přírodní proud s osou proudění mírně odkloněnou od přepážky a rozšířením pod úhlem  $28,1^\circ$  při bočním pohledu a při čelním pohledu mírně uhýbající vpravo. Soustava dírek generovala přírodní proud s osou proudění mírně odkloněnou k přepážce a velkým rozšířením pod úhlem  $52,3^\circ$  při bočním pohledu. Při čelním pohledu došlo k odklonu proudu ve směru od přívodů vzduchu, takže se vytvořilo proudění ve tvaru trojúhelníku. U přívodu vzduchu soustavou trubiček byl generován přírodní proud s osou proudění mírně odkloněnou k přepážce a rozšířením pod úhlem  $25,9^\circ$  při bočním pohledu. Při čelním pohledu byl generovaný proud rovnoměrný. Řešení s přívodem vzduchu dírkami je výrobně nenáročné, ale dle vizualizace při čelním pohledu nevhodné kvůli tvaru výstupního proudu.

Dále navazují výsledky měření účinnosti odsávání metodou stopového plynu. Z výsledků je patrné, že při použití pracovního stolu – přepážky a plynu se záporným Archimedovým číslem (s větší hustotou než okolní vzduch) je dosahováno více než dvojnásobných záchytných vzdáleností oproti variantě s odsáváním ve volném prostoru. Pro simulaci plynu s kladným Archimedovým číslem vůči přepážce byla přepážka umístěna do dvou různých poloh nad odsávací štěrbinu. Nejlepších výsledků účinnosti odsávání v ose odsávací štěrbinou s přepážkou v úrovni horní hrany příruby bylo dosahováno, pokud bylo využito pro přívod vzduchu štěrbinou a soustavou dírek. Při odsávání s přepážkou umístěnou v úrovni horní hrany odsávací štěrbinou bylo dosahováno vyšší účinnosti odsávání v ose odsávací štěrbinou, pokud bylo využito pro přívod vzduchu dírek a trubiček i když účinná oblast nebyla vždy nejdelší.

Následuje porovnání výsledků měření rychlostních polí. Nejdelších oblastí účinného odsávání (oblast, ve které osová rychlost nepoklesla pod  $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  resp.  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) v ose odsávací štěrbinou s přepážkou v úrovni horní hrany příruby i s přepážkou v úrovni horní hrany odsávací štěrbinou bylo dosahováno při odsávání s přívodem vzduchu soustavou trubiček a soustavou dírek.

Energetická náročnost zvolených konfigurací zesíleného sacího nástavce s přepážkou je zkoumána dvěma přístupy. Nejdříve byl měřen příkon ventilátorů přímo na měřicí trati. V reálném provozu budou ale výsledné příkony odlišné, protože nebude nutné použít tak výkonné ventilátory zejména pro překonání tlakových ztrát průtokoměrů a vířiče. Proto byl uplatněn ještě druhý přístup, kdy bylo použito vypočítaného ztrátového příkonu (z Bernoulliho rovnice rozšířené o ztrátový příkon) nutného pro překonání tlakových ztrát a vytvoření potřebného dynamického tlaku na zesíleném sacím nástavci.

Z výsledků měření vyplývá, že v případě přepážky v úrovni horní hrany příruby je pro krátkou záchytnou vzdálenost do  $x/b = 12,5$  energeticky výhodnější použít štěrbinový zesílený sací nástavec s přívodem vzduchu štěrbinou, nad tuto vzdálenost vykazuje tradiční odsávání nižší příkon.

V případě přepážky v úrovni horní hrany odsávací štěrbinou vykazuje zesílené odsávání (všechny tři typy přívodu vzduchu) v celém zkoumaném rozsahu záchytných vzdáleností nižší spotřebu v porovnání s tradičním odsáváním. Zesílené odsávání s přívodem vzduchu štěrbinou vykazuje do záchytné vzdálenosti  $x/b = 14,9$  nižší příkon než zesílené odsávání s přívodem vzduchu trubičkami. Při požadavku na delší záchytnou vzdálenost (která je obvykle požadována vždy) vykazuje zesílené odsávání s přívodem vzduchu trubičkami nižší příkon.

Následuje poslední část práce popisující nejistoty měření.

Měření metodou stopového plynu bylo časově náročné a i přes provedenou částečnou automatizaci – připojení průtokoměrů a ventilátorů k měřicímu PC a řízení jejich výkonu pomocí PI regulátoru. Také použití traverzovacího systému značně zjednodušilo měření a v neposlední řadě využití sondy IAQ pro měření stopového plynu na pozadí zrychlilo měření v jednom bodě na cca  $1/3$  původního času měření. Navíc bylo nutné věnovat čas přípravě jednotlivých experimentů, ustálení proudění a testovacím měřením. V průběhu měření docházelo také k selhávání techniky – došlo k závadě krokového motorku analyzátoru plynů, který byl nejdříve opraven a následně vyměněn za nový. Dále byly na všech třech vysokotlakých ventilátorech měněny uhlíkové kartáčky.

Výrobce již ale dodával náhradu, která byla pravděpodobně tvrdší a brzy způsobila vydření komutátorů, takže nakonec musely být všechny ventilátory vyměněny. Při vydření komutátoru jednoho z motorů došlo také ke spálení elektronického regulátoru, který musel být vyměněn za nový.

Výsledky je tedy možné shrnout následovně: všechny varianty zesíleného odsávání dosahují lepších výsledků účinnosti odsávání než při tradičním odsávání. Použitím štěrbinového zesíleného sacího nástavce s přívodem vzduchu trubičkami a přepážkou v úrovni odsávací štěrbinu při odsávání škodliviny s kladným Archimedovým číslem (nižší hustota) vykazoval tento systém vyšší účinnost odsávání v ose odsávací štěrbinu (až o 10 % dle pracovního parametru) v porovnání se zesíleným štěrbinovým odsávacím systémem s přívodem vzduchu štěrbinou. S přívodem vzduchu trubičkami bylo při měření rychlostí v ose odsávací štěrbinu a obou poloh přepážky dosahováno vyšších rychlostí, resp. větších zachytných vzdáleností při stejné zachytné rychlosti proudění. Nakonec při použití zesíleného sacího nástavce s přívodem vzduchu trubičkami a přepážkou v úrovni odsávací štěrbinu bylo dosaženo nižšího příkonu ventilátorů pro dosažení zachytné vzdálenosti větší než  $x/b = 14,9$ . U vypočítaného ztrátového příkonu již vycházel lépe přívod vzduchu štěrbinou díky nižší tlakové ztrátě. Přívod vzduchu dírkami byl výrobně levnější než přívodní trubičky, ale přívod vzduchu dírkami nezajišťuje stejné parametry odsávání po celé délce štěrbinu díky nevhodnému tvaru přívodního proudu a v případě jeho úpravy pro zrovnomnění proudění bude mít pak i jiný ztrátový příkon.

Závěrem lze konstatovat, že všechny cíle dizertační práce, vymezené na počátku studia a při státní doktorské zkoušce, byly zcela splněny. Za hlavní přínos práce je možné považovat především porovnání chování odsávacího systému s pracovním stolem – přepážkou pod sacím nástavcem při využití stopového plynu těžšího než vzduchu a při konfiguraci s přepážkou nad odsávací štěrbinou, kdy toto uspořádání modeluje pracovní stůl se škodlivinou lehčí než vzduch. Dále je přínosem práce posouzení vlivu přívodního proudu na rychlostní pole a na účinnost odsávání. A v neposlední řadě je dosaženým výsledkem také porovnání energetické náročnosti tradičního štěrbinového sacího nástavce se zesíleným štěrbinovým sacím nástavcem s různými typy přívodu vzduchu.

Dílní výsledky práce byly rovněž součástí řešení následujících projektů, na nichž se autor během doktorského studia podílel jako:

- hlavní řešitel juniorského projektu specifického výzkumu VUT v Brně FSI-J-12-25 „Experimentální výzkum proudových polí před zesíleným sacím nástavcem situovaným nad pracovním stolem“ v roce 2012,
- spoluřešitel projektu specifického výzkumu VUT v Brně FSI-S-11-6 „Komplexní modelování interakce člověka a prostředí v kabinách dopravních prostředků a obytných prostorách a návrhové nástroje (tzv. Human Centered Design)“ v letech 2011-2013,
- spoluřešitel projektu GAČR 101/09/H050 „Výzkum energeticky úsporných zařízení pro dosažení pohody vnitřního prostředí“ v letech 2010-2012.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

AABERG, C. P. *Plant for ventilation of rooms, more particularly in stables*. USA. 3401621. Zapsáno 1968.

ACGIH. *Industrial Ventilation - A Manual of Recommended Practice*. 29. Cincinnati (USA): American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2016. ISBN 9781607260875.

BOUZEK, V. *Účinnost odsávání zesíleného štěrbinového sacího nástavce*. Brno: VUT v Brně, 2004, 50 s. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Janotková E.

ČSN EN 1093-4+A1. *Bezpečnost strojních zařízení – Hodnocení emise nebezpečných látek šířitelných vzduchem – Část 4: Účinnost zachycení odsávacím zařízením – Metoda značených atomů*. 2008.

FLETCHER, B. Centreline velocity characteristics of rectangular unflanged hoods and slots under suction. *The Annals of Occupational Hygiene*, 1977, 141-146.

FLETCHER, B. Effect of flanges on the velocity in front of exhaust ventilation hoods. *Annals of Occupational Hygiene*. 1978, 21(3), 265-269. ISSN 00034878.

GOODFELLOW, H. a E. TAHTI. *Industrial Ventilation Design Guidebook*. San Diego: Academic Press, 2001. ISBN 0122896769.

HØGSTED, P. *Air movements controlled by means of exhaustion*. International, Proceedings of Spaces, Conference on Air Distribution in Ventilated. Stockholm (Sweden), 1987.

HUNT, G. R. a D. B. INGHAM. The fluid -mechanics of a 2-dimensional aaberg exhaust hood. *Annals of Occupational Hygiene*. 1992, 36(5), 455-476. ISSN 00034878.

HYLDGARD, C.E. *Aerodynamic control of exhaust*. In: Proceedings of the Room Vent 87. Stockholm, 1987.

CHYSKÝ, J. a K. HEMZAL. *Větrání a klimatizace*. Praha: Česká Matica technická, 1993, 3. ISBN 8090157408.

JANOTKOVÁ, E. *Technika prostředí*. Brno: VUTIUM, 1991, 201 s. ISBN 802140258X.

KREJČÍ, V. *Reinforced exhaust systems investigation*. Brno, 2006. Dizertační práce. VUT v Brně. Školitel Pavelek M.

PATOČKA, S. a E. JANOTKOVÁ. Vývoj experimentálního zařízení pro výzkum lokálního odsávání škodlivin. In: *Proceedings of the Fluid Dynamics 2000*, Praha: Institute of Thermomechanics Academy of Sciences of the Czech Republic, 2000.

PEDERSEN, L. G. a P. V. NIELSEN. *Exhaust System Reinforced by Jet Flow*. In Proceedings of the Ventilation 91, Cincinnati, Ohio (USA), 1991.

PECH, O. *Výzkum efektivních způsobů větrání*. Pavelek, M. Brno: VUT v Brně, 2013, 39 s. Pojednání ke státní doktorské zkoušce. Školitel Pavelek M.

PECH, O., a M. PAVELEK. Úprava zařízení pro testování a výzkum sacích nástavců. In: *Sborník příspěvků 31. mezinárodní konference Setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky*. Brno: VUT v Brně, 2012b, 177-180. ISBN: 9788021445291.

SAUNDERS, C. J. a B. FLETCHER. Jet enhanced local exhaust ventilation. *Annals of Occupational Hygiene*. 1993, 37(1), 15-24. ISSN 00034878.

## ŽIVOTOPIS AUTORA

### *Osobní údaje*

Jméno a příjmení **Ing. Ondřej Pech**  
E-mail Ondrej.Pech@vutbr.cz  
Telefon +420 777 607 639  
Datum narození 19. 1. 1986

### *Vzdělání*

Období **2010 – doposud**  
Stupeň doktorský  
Obor Konstrukční a procesní inženýrství  
Škola Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně

Období **2008 – 2010**  
Stupeň magisterský  
Obor Strojní inženýrství - Technika prostředí  
Škola Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně

Období **2005 – 2008**  
Stupeň bakalářský  
Obor Strojní inženýrství  
Škola Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně

### *Pracovní zkušenosti*

Období **2012 – doposud**  
Pozice Technický pracovník  
Organizace Škoda Auto a.s., Mladá Boleslav  
Hlavní aktivity Výzkum proudových polí z ofukovačů

Projekty Spolupráce na projektech GAČR 101/09/H050,  
TE 01020020, ED0002/01/01 NETME Centre a LO1202  
NETME Centre Plus, FSI-S-11-6, FSI-S-14-2355  
Hlavní řešitel projektů FSI-J-12-25, FSI-J-13-2042  
interní grantové agentury VUT v Brně

Počet publikací 16

### *Ostatní dovednosti*

PC znalosti AutoCad, Inventor, TRNSYS, Microsoft Office™  
Jazyky anglický jazyk: aktivní znalost  
německý jazyk: pasivní znalost

## ABSTRAKT

Při výrobních technologiích jsou často generovány a uvolňovány různé plynné látky, které jsou mnohdy zdraví škodlivé. Do pracovního prostředí se těchto látek tedy musí dostávat co nejmenší množství. Nejvyšší účinnost zachycení plynných škodlivin umožňuje lokální odsávání. Jeho nevýhodou je nutnost co nejlépe obklopit zdroj škodlivin nebo být zdroji co nejbližší, což většinou není technicky nebo technologicky možné. Možnou alternativou je využití zesíleného odsávacího systému, který dosahuje větších záchytných vzdáleností. V rámci dizertační práce byla provedena rešerše zesílených odsávacích systémů. Následně byla upravena stávající měřicí trať pro měření s přepážkou nad štěrbinovým sacím nástavcem a současně byla měřicí trať částečně automatizována. Pro postihnutí případu škodliviny s hustotou menší než vzduch byl pracovní stůl přesunut nad odsávací štěrbinu. Na základě rešerše byla navržena úprava štěrbinového zesíleného odsávacího nástavce, která spočívala v úpravě přívodu vzduchu. Místo přívodní štěrbinu bylo využito soustavy dírek a soustavy trubiček pro vyšší turbulizaci proudění a tím zvýšení účinnosti odsávání. Následně byly přívodní proudy ze štěrbinu, dírek i trubiček vizualizovány kouřovou metodou. Dále bylo provedeno měření účinnosti odsávání metodou stopového plynu a měření rychlostních polí před navrženými konfiguracemi štěrbinového zesíleného sacího nástavce. V závěru výzkumných prací bylo provedeno zhodnocení energetické náročnosti všech způsobů odsávání měřením příkonu ventilátorů a výpočtem ztrátového příkonu.

## SUMMARY

Many production technologies generate a variety of gas pollutants, which are unhealthy. The aim is therefore to minimize the content of such gas pollutants in the work environment. The highest capture efficiency of gas pollutants offers the local exhausting. Its disadvantage is the necessity to surround the source of pollutants, or to be as close as possible which is usually not technically or technologically possible. A possible alternative is to use a reinforced exhaust system that achieves greater capture distances. In the initial stage of the solution of the dissertation, a review of reinforced exhaust systems was carried out. Further, an existing measurement system was modified for measurements with the partition above the exhaust slot and the measurement system was partially automated. In order to investigate the case with pollutants having a lower density than the air, the workbench - the partition was moved above the exhaust slot. Based on of the literature review, a modification of the reinforced slot exhaust system was proposed. The modification consisted in the adjustment of the air inlet adjustment where a set of holes and a tube assembly were used instead of the slot. Such setup allowed for higher flow turbulence and thus for an increased exhaust efficiency. Subsequently, the inlet streams from the slot, holes and tubes were visualized by the smoke method. Further measurements were carried out by the tracer gas method for the determination of the exhaust efficiency. Measurements of velocity fields in front of the proposed configurations of the reinforced slot exhaust hood were also carried out. In conclusion, an energy performance assessment was carried out by means of the measurement of the electric power input to the fans with the determination of the electric loss power.