

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF ENERGY

VÝZKUM ÚČINNOSTI ZESÍLENÉHO ODSÁVACÍHO  
SYSTÉMU V KOMBINACI S PRACOVNÍM STOLEM  
THE CAPTURE EFFICIENCY RESEARCH OF REEXS WITH THE WORK BENCH

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

DAVID PAVLAS

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Doc. Ing. EVA JANOTKOVÁ, CSc

BRNO 2008

**LICENČNÍ SMLOUVA**  
**POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO**

uzavřená mezi smluvními stranami:

**1. Pan/paní**

Jméno a příjmení: David Pavlas  
Bytem: Lelkova 40, Brno 637 00  
Narozen/a (datum a místo): 29.5.1980 Tábor

(dále jen „autor“)

a

**2. Vysoké učení technické v Brně**

Fakulta strojního inženýrství  
se sídlem Technická 2896/2, 616 69, Brno  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
doc Ing. Zdeněk Skála, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

**Čl. 1**  
**Specifikace školního díla**

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):
- disertační práce
  - diplomová práce
  - bakalářská práce
  - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP:	Výzkum účinnosti zesíleného odsávacího systému v kombinaci s pracovním stolem
Vedoucí/ školitel VŠKP:	doc. Ing. Eva Janotková, CSc
Ústav:	Energetický ústav
Datum obhajoby VŠKP:	listopad 2008

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v\*:

- tištěné formě počet exemplářů 2
- elektronické formě počet exemplářů 1

\* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.

Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.

Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.

Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

Brně dne: 6.9.2008

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## Abstrakt

Předložená diplomová práce se zabývá stanovením účinnosti odsávání vznikající škodliviny zachycené pomocí zesíleného štěrbinového odsávacího systému v sestavení s pracovním stolem pomocí metody stopového plynu. V diplomové práci jsou uvedeny výsledky měření provedených jak při režimu tradičního odsávání, bez přívodu radiálního proudu vzduchu, tak při odsáváním zesíleném, s přívodem radiálního proudu vzduchu. Práce rovněž obsahuje porovnání, diskuzi výsledků a stanovení chyb a nejistot měření.

## Abstract

Proposed diploma work provides capture efficiency measurements of generated pollution captured by reinforced slot exhaust system in modification with work bench using tracer gas method. There are shown results of capture efficiency for traditional exhausting (no radial air added) and reinforced exhausting (using radial air supply effect) in this work. This study also contains the comparison and discussion of obtained measurement results with measurement errors and uncertainties.

## Klíčová slova

zesílený štěrbinový odsávací systému, stopový plyn

## Key words

reinforced slot exhaust system, tracer gas method

### **Bibliografická citace práce:**

PAVLAS, D. *Výzkum účinnosti zesíleného odsávacího systému v kombinaci s pracovním stolem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 47 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Eva Janotková, CSc.

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci na téma výzkum účinnosti zesíleného odsávacího systému v kombinaci s pracovním stolem jsem vypracoval samostatně bez cizí pomoci. Vycházel jsem při tom ze svých znalostí, odborných konzultací a doporučené literatury, uvedené v seznamu.

V Brně dne 6.9. 2008

## Poděkování:

Mé poděkování patří doc Ing. Evě Janotkové, CSc za velmi trpělivé vedení a cenné rady.

# Obsah

1 Úvod.....	8
2 Technika prostředí.....	9
2.1 Pohoda prostředí.....	9
2.2 Tepelná pohoda prostředí.....	10
2.3 Škodliviny ve vnitřním vzduchu.....	10
3 Větrání.....	11
4 Lokální odsávání.....	12
4.1 Aabergův sací nástavec.....	20
5 Metoda stopového plynu.....	22
5.1 Zařízení pro přívod stopového plynu.....	23
5.2 Zařízení pro odběr vzorků.....	23
5.3 Analyzátor plynů.....	23
5.3.1 Cyklus měření koncentrace stopového plynu ve vzorku vzduchu.....	24
5.3.2 Použití metody stopového plynu.....	24
5.3.3 Podmínky pro volbu stopového plynu.....	25
6 Experimentální zařízení.....	26
7 Měření účinnosti odsávání a jejich výsledky.....	32
7.1 Stanovení účinnosti sacího nástavce.....	32
7.2 Podmínky měření účinnosti sacího nástavce.....	32
7.3 Výsledky měření účinnosti odsávání.....	33
8 Rozbor nejistot měření.....	37
8.1 Chyby a nejistoty při měření.....	38
8.1.1 Přímá měření.....	38
8.1.2 Nepřímá měření.....	39
8.2 Stanovení chyb a nejistot při měření účinnosti odsávání.....	40
8.2.1 Chyby a nejistoty při měření tlaku.....	40
8.2.2 Chyby a nejistoty při měření teploty.....	41
8.2.3 Chyby a nejistoty při měření průtoku vzduchu a stopového plynu.....	42
8.2.4 Nejistota nastavení poměru průtokových hybností I.....	44
8.2.5 Nejistota měření účinnosti odsávání.....	45
9 Závěr.....	47
10 Seznam použitých zdrojů.....	48
Seznam nejdůležitějších použitých symbolů.....	49
Seznam příloh.....	51

# 1 Úvod

Hlavním úkolem a cílem této diplomové práce je experimentální výzkum účinnosti šterbinového zesíleného odsávacího systému známého pod názvem REEXS (Reinforced Exhaust System ) v kombinaci s pracovním stolem.

První část mé diplomové práce poskytuje důležité informace nutné k pochopení problematiky větrání, zesíleného odsávacího systému a hodnocení znečištění ovzduší.

Druhou část diplomové práce představuje samotný výzkum zahrnující měření účinnosti odsávání metodou stopového plynu a rozbor nejistot a chyb provedených měření. Pro metodu stopového plynu byl jako stopový plyn použit oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ). Výsledky měření účinnosti odsávání jsou znázorněny v grafické podobě pomocí programu Surfer 7 a poskytují tak představu o tvaru a velikosti účinné oblasti odsávání v prostoru před sacím nástavcem.



## 2 Technika prostředí

Technika prostředí je vědní obor zabývající se technickým řešením problémů spojených se zajištěním hygienických limitů stanovených hygienickými předpisy pro daný typ činnosti. Životní prostředí člověka, část světa s níž člověk přichází do styku, kterou přetváří a využívá k uspokojení svých potřeb, zahrnuje přírodní prostředí (ovzduší, voda, půda, přírodní síly, rostlinstvo a živočišstvo) a umělé prostředí (útvary vytvořené člověkem) [2].

### **Problematika životního prostředí se vztahuje na prostředí vnitřní a vnější:**

- hlavními problémy vnitřního prostředí, kde člověk tráví 70-80% svého času, je čistota ovzduší, zajištění tepelného stavu prostředí, ochrana proti hluku, vhodné osvětlení, ochrana před ionizujícím a elektromagnetickým zářením a jiné

### **Podle činnosti člověka dělíme životní prostředí:**

- pracovní prostředí (výrobní a administrativní budovy, řídicí kabiny, dopravní zařízení, polokrytá a otevřená pracoviště)
- obytné prostředí (určené k bydlení)
- rekreační prostředí (určené k rekreaci)
- léčebné, výchovné a jiné

### **Úpravy pracovního prostředí:**

- navržení strojního zařízení a technologických postupů, které neprodukují mnoho škodlivin
- pokud produkují škodliviny, omezujeme jejich únik do pracovního prostředí (hermetizace, lokální odsávání)
- upravujeme prostředí, které zprostředkovává přenos škodlivin ze zdroje na člověka (návrh technologického zařízení k dosažení optimálního tepelného stavu, čistoty ovzduší, hlukové a světelné podmínky atd.)
- účinek vnějších klimatických podmínek lze ovlivnit vhodně řešenou budovou (v zimě se vyplatí především vliv tepelné izolace, v létě kromě tepelné izolace i ochrana proti slunečnímu záření)
- individuální ochrana člověka pomocí osobních ochranných prostředků (dýchací přístroje, protihlukové přílby aj.), případně omezení doby člověka na pracovišti

## 2.1 Pohoda prostředí

Nutnou podmínkou pohody člověka je prostředí, v němž je dosaženo optimálních podmínek, za kterých člověk může pracovat s maximálním výkonem, zdravotně nezávadně žít a odpočívat. Prostor, ve kterém člověk pobývá, ovlivňuje jeho výkonnost.

Pohoda prostředí je komplex obklopujících okolností, podmínek a vlivů. Mezi činitele ovlivňující pohodu prostředí se řadí:

- hladina hluku
- tepelná pohoda prostředí
- elektrostatické pole
- počet a polarita iontů v ovzduší
- čistota okolního vzduchu (prachové částice, zápachy, atd.)
- intenzita osvětlení aj.

Všichni činitelé se navzájem ovlivňují a při jejich vhodné kombinaci nastává tzv. „pohoda prostředí“.

## 2.2 Tepelná pohoda prostředí

Tepelná pohoda prostředí je stav mikroklima, v němž má člověk vhodné tepelné podmínky pro zdravý pobyt a práci.

Činitelé, které rozhodují o tepelné pohodě prostředí, jsou:

- tepelná produkce člověka
- teplota vzduchu
- teplota okolních ploch (např.: teplota stěn, předmětů)
- rychlost proudění vzduchu
- vlhkost vzduchu
- intenzita turbulence
- oděv

## 2.3 Škodliviny ve vnitřním vzduchu

Škodlivinami mohou být plynné škodliviny, prach, různé zápachy, choroboplodné zárodky, ale také nadměrné teplo (sálavé i konvekční), způsobující pokles produktivnosti člověka a možné riziko poškození zdraví člověka, jelikož škodliviny ve vzduchu mohou mít toxický, karcinogenní nebo alergenní účinek. Při posuzování nebezpečí poškození zdraví je třeba přihlížet k intenzitě fyzické práce, kterou pracovníci konají. Se stoupající obtížností práce se zvětšuje objemový průtok vzduchu plicemi a proto je vhodné v provozovnách, v nichž lidé pracují těžce, snížit hodnoty nejvyšší přípustné koncentrace [1].

Škodliviny ve vnitřním vzduchu působí škodlivě nejen na člověka, ale také na životní prostředí, budovy a zařízení v nich [2].

Zdrojem škodlivin ve vnitřním vzduchu je:

- výrobní činnost a s ní související průmyslové škodliviny
- člověk, jenž produkuje biologické škodliviny (příměsi)

**Průmyslové škodliviny** jsou plyny, páry a aerosoly kapalné nebo tuhé (prach, popeloviny ve spalínách).

**Prach** vzniká rozkladem a rozpadem organických či anorganických látek. Škodlivost prachu je dána velikostí prachových částic. Účinnou ochranou proti prachu je lokální odsávání a odlučování.

Za škodlivinu ve vzduchu považujeme také **nadměrné sálavé teplo**, kterému můžeme zabránit:

- snížením intenzity zdroje sálání (snížením povrchové teploty zdroje nebo zmenšením poměrné zářivosti povrchu zdroje)
- clonami proti sálání (mechanické nebo vodní)
- tepelnou izolací pracovníka (vícevrstvý oděv, světlý oděv, polepy hliníkovou fólií, oděv chlazený vzduchem)
- ochlazováním pracovníka (vzduchové sprchy, přímé rozprašování vody, sálavé ochlazovací panely) [2].

V místnostech s vyšším počtem pobývajících osob dochází vlivem dýchání ke zvyšování obsahu oxidu uhličitého CO<sub>2</sub> ve vzduchu, což je spojeno s jistým poklesem obsahu kyslíku ve vzduchu. Tento pokles však většinou nemá nepříznivý vliv na dýchání člověka, protože ani při dosažené maximální přípustné koncentrace tj. 0,5 obj.% oxidu uhličitého by obsah kyslíku neklesl pod 20,5%. Vlivem dýchání dochází také k nárůstu obsahu vodní páry

ve vzduchu. Nepříjemný pocit osob tedy plyne z narušení tepelné pohody při velké relativní vlhkosti vzduchu v místnosti [5].

**Zápach** je plynná škodlivina, znečištění vnímané lidmi jako nepříjemné a obtěžující. V občanských budovách je nejčastějším zdrojem zápachu kuchyň, jídelna nebo toaleta, v průmyslových budovách to je např. laboratoř. Zápach není možné měřit. Koncentrace zápachu se posuzuje dle jednotky olf. Jeden olf je dávka emise biologických příměsí do vzduchu od standardní osoby, což je průměrný dospělí člověk, velmi lehce pracující při tepelné pohodě, který se průměrně myje 0,7 krát denně. Jiné zdroje znečištění lze vyjádřit počtem olfů tj. počtem osob, které by způsobily stejnou nespokojenost, jako skutečný zdroj zápachu. Další používanou jednotkou je 1 decipol. Jeden decipol je koncentrace biologických zápachů v místnosti ze zdroje znečištění 1 olf větrané čistým vzduchem o objemovém toku 10 l/s [3].

**Choroboplodné zárodky** jsou bakterie, viry, plísně, které se pohybují na nosičích jako prach a kapénky.

Odvod škodlivin ve vnitřním vzduchu z objektů, ve kterých se pohybují lidé a přivádění čerstvého vzduchu je úkolem větrání. Technická opatření a výměny vzduchu musejí zajistit, aby obsah škodlivin nepřesáhl nejvyšší přípustné koncentrace stanovené Nařízením vlády [9], [10].

### 3 Větrání

Větráním rozumíme výměnu vzduchu v uzavřeném prostoru za venkovní. Principem větrání je výměna vzduchu znehodnoceného za vzduch čerstvý, venkovní. Proudění vzduchu ve větraném prostoru je způsobeno nuceným, mechanickým pohybem (ventilátory) nebo přirozeným tlakovým rozdílem (vlivem rozdílných hustot vzduchu vně a uvnitř větraného prostoru i účinkem větru). Větráním se upravuje čistota ovzduší ve větraném prostoru (odvodem škodlivin), dílčím způsobem i tepelný stav prostředí (odvodem tepelné zátěže) a větrání slouží i k vyrovnání vzduchové bilance u odsávacích systémů.

Z hlediska časového můžeme větrání rozdělit na větrání trvalé (vzduch se vyměňuje spojitě po celou dobu provozu) a občasně (vzduch se vyměňuje v časových intervalech) [1].

#### Soustavy větrání:

- **Přirozené větrání** – k výměně vnitřního vzduchu za venkovní se využívá rozdílných hustot vzduchu, které mají za následek přirozený rozdíl tlaků uvnitř a vně větraného prostoru (infiltrace, provětrávání, aerace, šachtové větrání). Aeraci a šachtové větrání, při správné aplikaci, lze využít k trvalému větrání. Infiltrace a provětrávání mají funkci časově omezenou. Trvale může být přirozené větrání využíváno pouze tehdy, je-li potřebný tlakový rozdíl zajištěn nepřetržitě v požadovaném období. Celoroční vyhovující podmínky pro aeraci poskytují teplé a horké průmyslové provozy (v hutích, energetice), kdy teplota vnitřního vzduchu je trvale vyšší než teplota venkovního vzduchu. V mnoha dalších objektech, zvláště v letním období, jsou teplotní rozdíly malé a přirozené větrání je nespolehlivé. V budovách se značnou tepelnou kapacitou může být v letním období teplota vzduchu uvnitř budovy (větrací šachty) i nižší než teplota venkovního vzduchu – směr proudění je pak opačný (shora dolů), což u provozů se zdroji škodlivin je nepřijatelné. Tlakový účinek větru není rovněž trvalý, neboť rychlost a směr větru jsou proměnné a tlakový součinitel větru je zpravidla znám pouze pro budovy stojící ve volném terénu, což není obvyklé. Nevýhodou přirozeného větrání je, že venkovní přiváděný vzduch nelze filtrovat a do přívodního systému nelze zařadit ohřívač vzduchu

– účinný tlak je malý a nepostačuje k překonání tlakových ztrát těchto prvků. Příznivé je, že přirozené větrání nevyžaduje energii pro dopravu vzduchu, proto v odůvodněných případech je jeho uplatnění vhodné. Infiltrace je přirozené větrání netěsnými spárami oken, dveří. Přívod venkovního vzduchu infiltrací do místností je nejintenzivnější v zimě, kdy zvyšuje tepelné ztráty. Proto je také odpovídající tepelná ztráta součástí výpočtu tepelných ztrát budov (ČSN 06 0210 nebo ČSN EN 12 831). Zdokonalené těsnění oken přirozené větrání infiltrací omezuje, často až pod hygienické požadavky na přívod čerstvého venkovního vzduchu. Omezené větrání v zimním období snižuje odvod vlhkosti (z kuchyní aj.), což může vést ke kondenzaci vodních par na vnitřním povrchu (nedostatečně tepelně izolovaných) obvodových konstrukcí, k jejich navlhčení, tvorbě plísní i k narušení konstrukce. Některé konstrukce oken jsou proto vybavovány štěrbinami, kterými lze regulovat přívod venkovního vzduchu. Provětrávání je občasné větrání otíráním oken. Spodní částí otevřeného okna proudí do místnosti chladnější vzduch venkovní, horní částí okna se vzduch z místnosti odvádí [1].

- **Nucené větrání** – pro výměnu vzduchu je zapotřebí hnací aparát (ventilátor), který je zapojen jen pro odvod vzduchu z místnosti, nebo pro jeho přívod, nebo kombinaci obou uvedených způsobů. Dle poměru průtoků přiváděného a odváděného vzduchu (tzv. součinitele větrací rovnováhy  $\epsilon$ ) rozeznáváme větrání přetlakové ( $\epsilon > 1$ ), podtlakové ( $\epsilon < 1$ ), nebo rovnotlaké ( $\epsilon = 1$ ). Přetlakové větrání se používá pro větraný prostor obklopený místnostmi s nižšími požadavky na čistotu vzduchu. Podtlakové větrání zabraňuje vnikání nežádoucích látek z větraného prostoru do jeho okolí. Systémy nuceného větrání umožňují větrací vzduch upravovat a také řídit tlakové poměry v budově.
- **Kombinace přirozeného a nuceného větrání tzv. hybridní větrání** – v období příznivých klimatických poměrů je v činnosti přirozené větrání a v období, kdy přirozené větrání nepostačuje využívá nuceného větrání.

#### **Rozdělení větrání dle prostoru:**

- **lokální větrání** – využijeme ho, pokud jsou větší zdroje škodlivin soustředěny do jednoho místa. Z tohoto místa pak můžeme vzduch odvádět (lokální odsávání), nebo jej můžeme přivádět (vzduchová clona, sprcha, oáza).
- **celkové větrání** – používá se tam, kde nejsme schopni určit přesné místo vzniku škodlivin (výroby bez pevných stanovišť), nebo kde jsou zdroje škodlivin rovnoměrně rozmístěny. Zajišťuje pokud možno rovnoměrné provětrání pásma pobytu osob (pracovní oblasti), nebo jinak definovaného technologického prostoru. Celkové větrání se používá především tam, kde nevýrazné zdroje škodlivin (tepla) jsou v prostoru rovnoměrně rozmístěny [1].

## **4 Lokální odsávání**

Lokální odsávání omezuje zátěž prostoru škodlivinami a snižuje nároky na celkové větrání. U větších odsávacích zařízení musíme doplnit odsávaný vzduch nuceným přívodem. Hlavním účelem lokálních odsávacích zařízení je buď zcela vyloučit, nebo alespoň minimalizovat únik vznikající škodliviny do okolního prostředí, kde by mohla mít negativní vliv na osoby pobývající v okolí zdroje škodliviny. V pracovní oblasti lidí nesmí unikající škodlivina překročit nejvyšší přípustnou koncentraci ve vzduchu [9], [10].

Z uvedeného vyplývá, že lokální odsávání je vždy hospodárnější než celkové větrání pro stejný zdroj škodlivin, jelikož koncentrace škodlivin v odváděném vzduchu mohou být

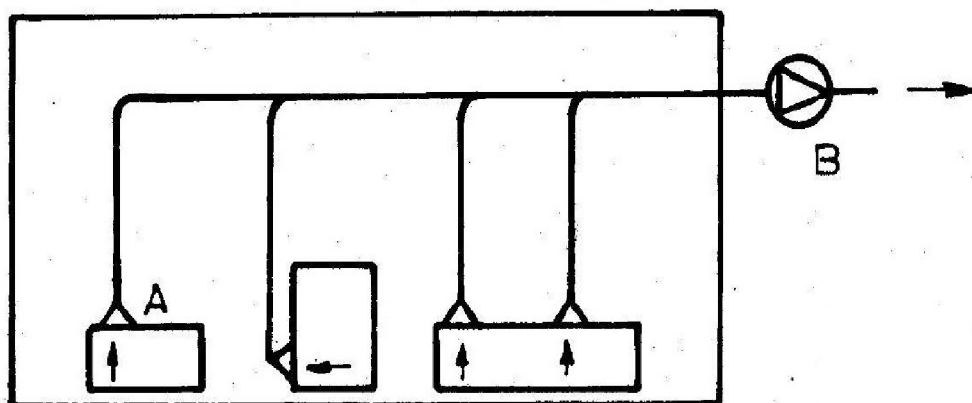
vyšší než u větrání celkového, kde koncentrace v odváděném vzduchu nesmí překročit nejvyšší přípustné koncentrace. Pokud koncentrace škodlivin v odsátém vzduchu splňují hygienické požadavky, lze vzduch z těchto odsávacích zařízení vyfukovat přímo do venkovního ovzduší. Vzduch s vyššími koncentracemi se odvádí k odlučovacím zařízením.

Lokální odsávání se zřizuje všude tam, kde na ohraničených místech (v pracovním i obytném prostředí, u strojů a technických zařízení) se uvolňují látkové škodliviny, nebo nadměrný tepelný tok. Na odsávací zařízení se kladou tyto hlavní požadavky:

- Škodliviny musí být zachycovány přímo u zdroje, aby bylo zabráněno jejich přenosu do ovzduší v pásmu pobytu osob.
- Odvod a likvidace škodlivin musí být provedeny tak, aby nebylo znehodnoceno venkovní prostředí.
- Pokud se odsávacím zařízením odvádí vzduch do venkovního prostředí, je třeba do místnosti přivádět filtrovaný a v zimě ohříváný venkovní vzduch. Splňuje-li odlučovací zařízení hygienické požadavky na kvalitu oběhového vzduchu, je účelné vždy využít vzduch oběhový, neboť se tak podstatně snižuje spotřeba energie na ohřev přiváděného vzduchu v zimním období.
- Nelze-li použít z hygienických nebo bezpečnostních důvodů oběhový vzduch, je účelné řešit odsávací zařízení s výměníky na zpětné získávání tepla z odsávaného vzduchu k ohřevu přiváděného venkovního vzduchu (zařízení ZZT), což rovněž vede k snížení energetické spotřeby.
- Odsávací zařízení musí splňovat bezpečnostní požadavky (např. pevnostní požadavky u zákrytů rotujících součástí), požadavky požární ochrany (včetně zabránění vzniku výbušných směsí) i provozní spolehlivosti (především u zařízení pro nepřetržitý provoz).

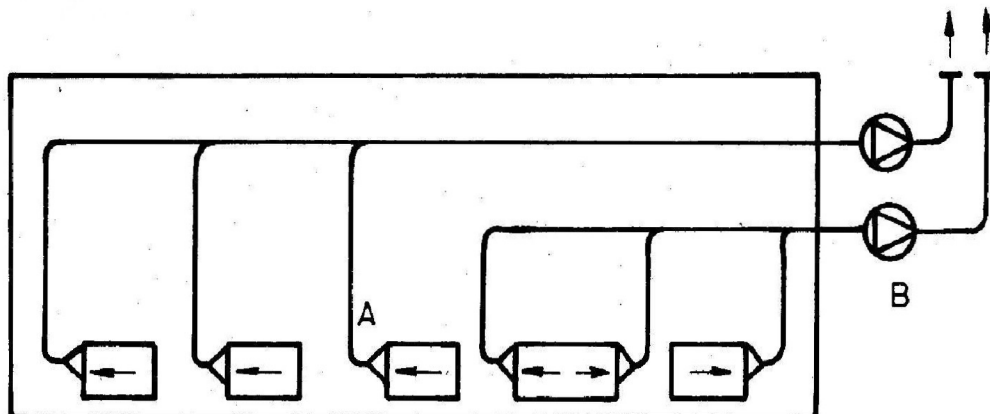
#### Lokální odsávací zařízení jsou:

- **Ústřední zařízení** odsávají škodliviny sacími nástavci A od několika zdrojů stejného či podobného charakteru prostřednictvím společné potrubní sítě a společného ventilátoru B (obr. 4.1).



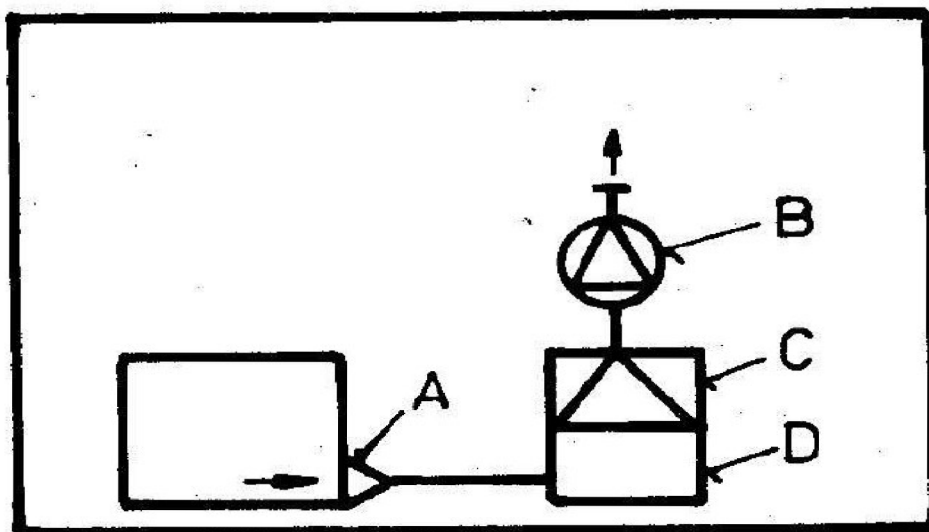
Obr. 4.1 Ústřední zařízení [2]

- **Skupinová zařízení** slouží k odsávání škodlivin pouze určité skupiny zdrojů stejného nebo podobného druhu, voleného tak, aby nedocházelo ke směšování látek, které by mohly spolu reagovat a vytvářet jedovaté nebo výbušné sloučeniny a směsi (obr. 4.2).



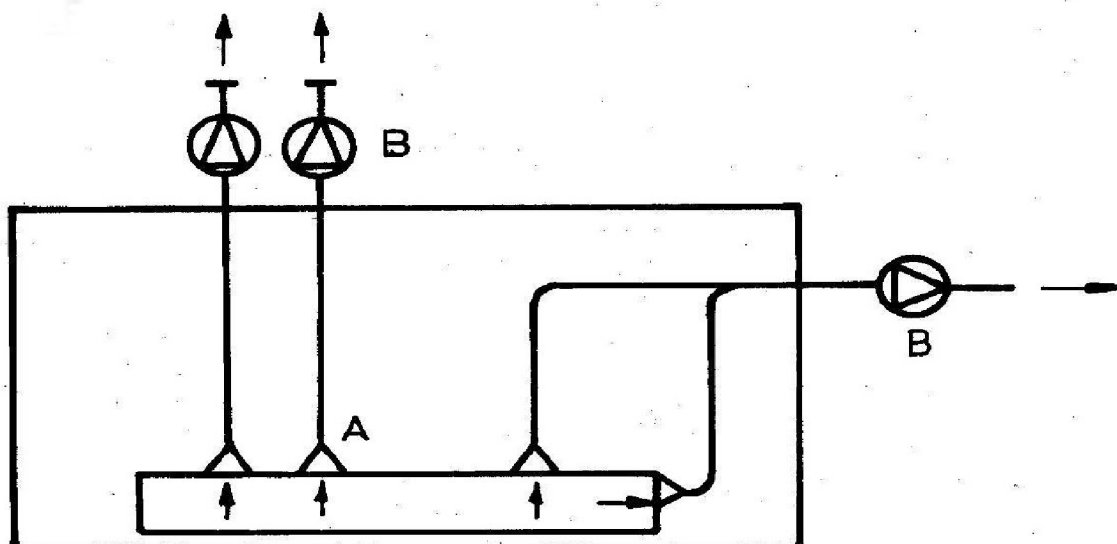
Obr. 4.2 Skupinové zařízení [2]

- **Jednotková zařízení** se skládají ze sacího nástavce A, ventilátoru s elektromotorem B, odlučovače prachu nebo filtru C, zásobníku na prach D a z výfukové hlavice spojené případně s tlumičem hluku. Vzduch je po filtraci vyfukován zpět do místnosti. Používá se hlavně u prašných zdrojů (obr. 4.3).



Obr. 4.3 Jednotkové zařízení [2]

- **Dělená zařízení** mají několik samostatných ventilátorů B se sacími nástavci A napojenými na jednu technologickou linku. Používají se u rozměrných linek nebo u takových technologií, kde se na několika místech vyvíjejí chemicky totožné škodliviny, avšak o různé intenzitě (obr. 4.4).



Obr. 4.4 Dělené zařízení [2]

Odsávací systémy se podle použití a konstrukce dále dělí na:

- pevné
- pružné
- pohyblivé

**Pevné** - není možné měnit jejich polohu vzhledem ke zdroji škodlivin.

**Pružné** - je u nich možné měnit polohu sacího nástavce a přizpůsobovat ji místu vzniku škodlivin.

**Pohyblivé** - zařízení je samostatné a nezávislé, je možné měnit jeho polohu podle potřeby.

### Lokální odsávací nástavce

V místě, kde škodliviny vznikají, jsou zachycovány sacími nástavci, které jsou nejdůležitější součástí odsávacího zařízení. Nástavec by měl vždy tvořit se strojem nebo technologickým zařízením jeden celek [11].

Konstrukcí nástavce můžeme citelně ovlivnit množství zachycených škodlivin. Pro představu o proudění vzduchu v okolí nástavce se uvádí rychlostní pole, které se zjišťuje obvykle experimentálně, nebo modelováním a výsledky se vynášejí graficky v bezrozměrných souřadnicích. Znázorňují se proudnice (čáry na jejichž tečnách leží vektory rychlosti) a izotachy, které představují konstantní poměrné rychlosti v % dle vztahu:

$$\bar{w}_{xy} = \frac{w_{xy}}{w_1} \cdot 100 [\%] \quad (4.1)$$

$\bar{w}_{xy}$  ... poměrná rychlost v místě o souřadnicích x, y

$w_{xy}$  ... rychlost v místě o souřadnicích x, y

$w_1$  ... rychlost v ústí odsávacího otvoru

### Hlavní typy sacích nástavců:

- odsávací skříně, chemické digestoře, kabiny pro stříkání nátěrových hmot, tryskání odlitků
- odsávací zákryty (střečovité, tvarově přizpůsobené)
- boční odsávací štěrby (technologie povrchových úprav)
- odsávací podlahové rošty
- jednoduché sací nástavce (používají se ve spojení s pružnými hadicemi k odsávání škodlivin vznikajících na proměnných místech např. při svařování)

### Pro návrh sacích nástavců platí tyto hlavní zásady [5]

- sací nástavec má být co nejbliže u zdroje, nejlépe zdroj zcela uzavírat
- sací nástavec musí být nastaven tak, aby částice škodlivin směřovaly k otvoru
- musí být navržen tak, aby pracovník při obsluze nepřicházel mezi zdroj škodlivin a sací nástavec
- musí zaručovat bezpečnost práce

### Nástavec u odsávacího zařízení podle jeho tvaru může být:

- kruhový
- obdélníkový
- štěrbinový

### Dále můžeme nástavce dělit na:

- tradiční
- zesílené

### Tradiční sací nástavec

K pochopení zesíleného odsávacího systému, je zapotřebí znalostí principu odsávacího systému s tradičním sacím nástavcem [5].

Pro rychlostní pole tradičního odsávacího nástavce platí, že je všesměrové, jelikož vzduch je odsáván ze všech směrů rovnoměrně.

Pro tradiční odsávací nástavec kruhového průřezu platí, že rychlost proudění odsávaného vzduchu klesá s druhou mocninou vzdálenosti od sacího otvoru, jak plyne z teorie propadu při potenciálním proudění, kdy rychlost  $w_r$  na kulové ploše ve vzdálenosti  $r$  od propadu je

$$w_r = \frac{\dot{V}_1}{4\pi r^2} \quad (4.2)$$

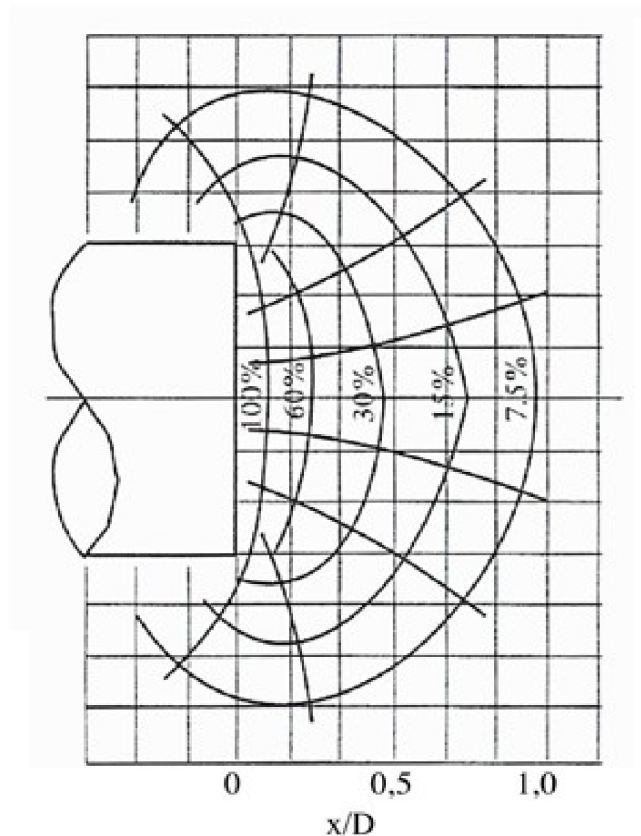
$\dot{V}_1$  ... objemový tok odsávaného vzduchu [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Uvedený vztah platí pro  $\frac{x}{D} \geq 1$ .

$D$  ... průměr odsávacího otvoru nástavce



x ... vzdálenost do kruhového sacího nástavce.



Obr. 4.5 Rychlostní pole tradičního kruhového sacího nástavce [8]

Pro tradiční štěrbinový sací nástavec (odsávací otvor je ve tvaru štěrbiny) platí, že rychlost proudění  $w_r$  odsávacího vzduchu klesá rovnoměrně se vzdáleností od sacího otvoru podle teorie rovinného propadu. Rychlost proudění  $w_r$  na válcové ploše ve vzdálenosti  $r$  od propadu je

$$w_r = \frac{\dot{V}_1}{2\pi \cdot r} \quad (4.3)$$

$\dot{V}_1$  ... objemový tok odsávaného vzduchu [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

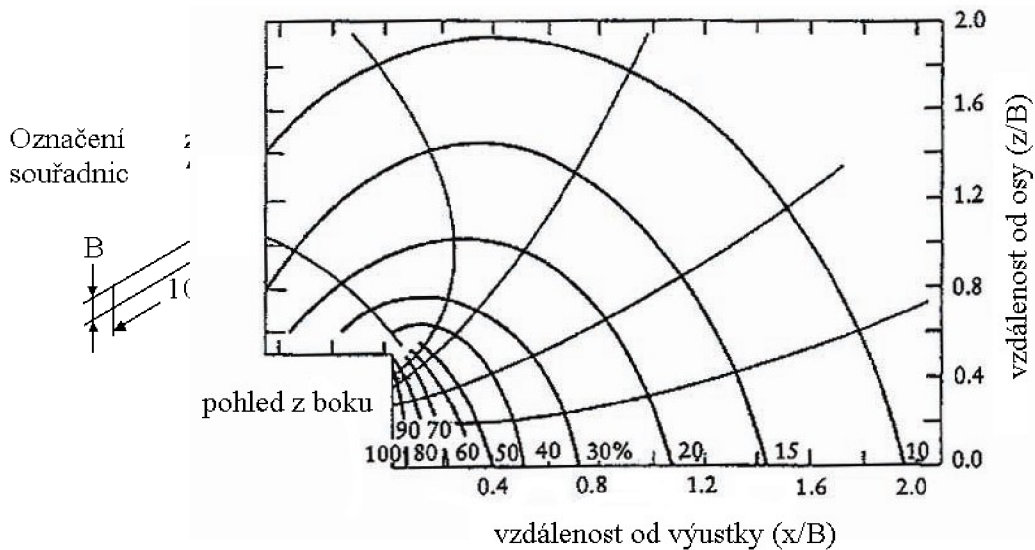
$A$  ... délka odsávací štěrbiny [m]

Uvedený vztah platí pro  $\frac{x}{B} \geq 2$ , kde  $B$  je šířka odsávací štěrbiny.

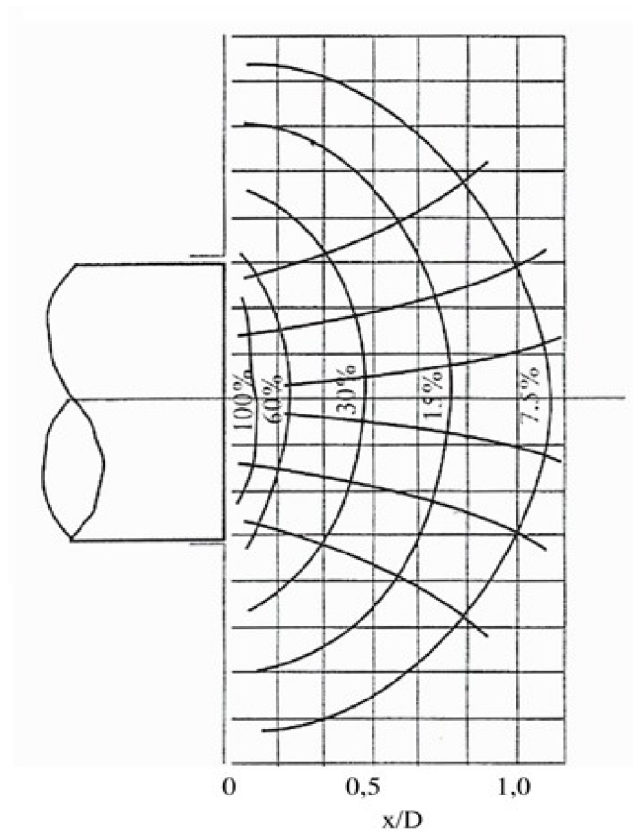
Rychlostní pole v oblasti blízké otvoru se od uvedeného teoretického případu liší. Pro vzdálenost  $\frac{x}{D} < 1$  u kruhového sacího nástavce a pro  $\frac{x}{B} < 2$  u štěrbinového sacího nástavce je rychlostní pole určené experimentálně uvedeno na obr. 4.5 a 4.6.

Z rychlostního pole kruhového i štěrbinového sacího nástavce (obr. 4.5 a 4.6) je zřejmé, že velké množství vzduchu je odsáváno z prostoru za sacím nástavcem. Z tohoto důvodu mohou být nástavce vybaveny přírubou, která zvyšuje účinnost odsávání v prostoru před sacím nástavcem a zlepšuje tvar proudového pole. Příruba zabraňuje přisávání vzduchu

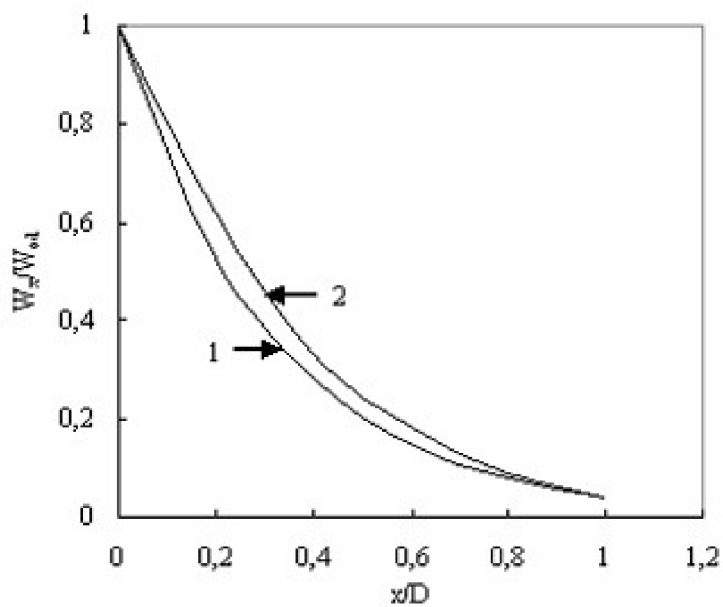
z prostoru za nástavcem. Efekt příruby na snížení poklesu poměrné osové rychlosti  $w_x/w_1$  ( $w_x$  je osová rychlost ve vzdálenosti  $x$  od sacího otvoru) se vzdáleností pro kruhové odsávací otvory je patrný z obr. 4.7 a obr. 4.8, kde je přímé srovnání osových rychlostí pro kruhový odsávací otvor s přírubou a bez příruby. Na obr. 4.9 je srovnání osových rychlostí pro obdélníkový odsávací otvor opět s přírubou a bez příruby. V tomto obrázku  $r_h$  je poloměr příruby nástavce.



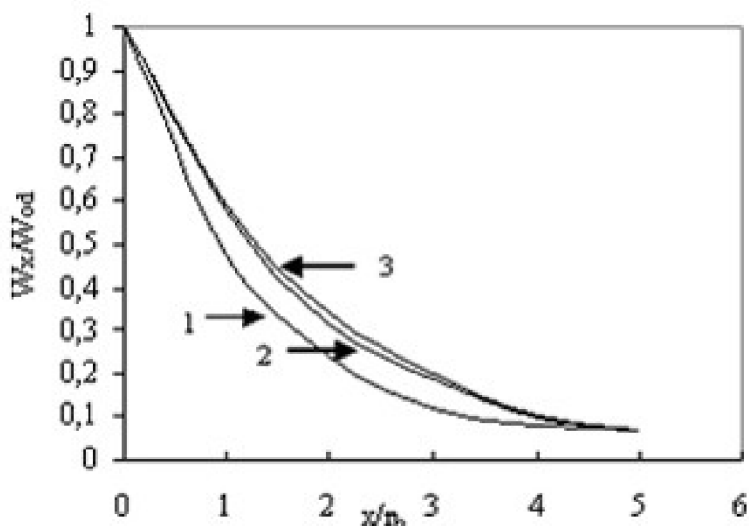
Obr. 4.6 Rychlostní pole tradičního štěrbinového sacího nástavce [8]



Obr. 4.7 Rychlostní pole tradičního kruhového sacího nástavce s přírubou [8]



Obr. 4.8 Diagram poměrných osových rychlostí v závislosti na vzdálenosti od sacího nástavce s kruhovým otvorem, 1 – bez příruby, 2 – s přírubou  $\varnothing = 1,6D$  [8]



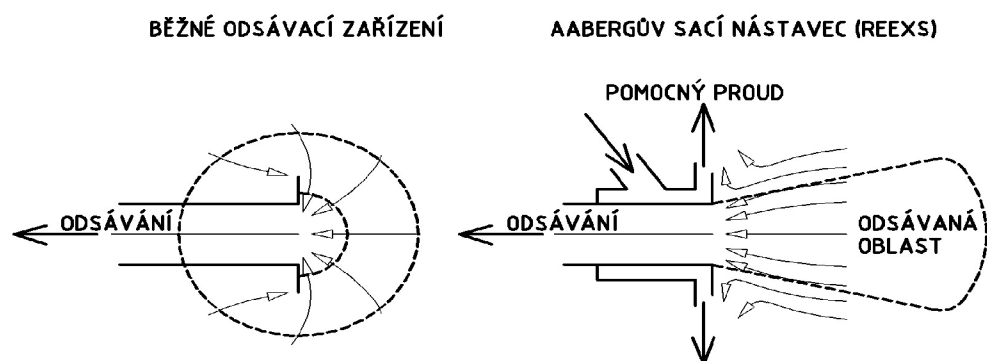
Obr. 4.9 Diagram poměrných osových rychlostí v závislosti na vzdálenosti od čela sacího nástavce s obdélníkovým otvorem, 1 – bez přírub, 2 – s přírubou šířky  $2,5b$  ( $b$  je menší rozměr obdélníku), 3 – s přírubou šířky  $4b$  [8]

#### 4.1 Aabergův sací nástavec

Pro nedostatečnou účinnost odsávání lokálními nástavci, přicházejí různá vylepšení. Jedno z neúčinnějších je zesílený odsávací systém, který si nechal patentovat C. P. Aaberg v roce 1965. Tento systém se rychle rozšířil pod názvem REEXS (Reinforced Exhaust System). Systém prodlužuje odsávanou oblast a zajišťuje směrovost proudového pole a to přívodem radiálního proudu vzduchu v přírubě nástavce [8], jak je patrné z obr. 4.10.

Vhodnou kombinací množství přiváděného a odsávaného vzduchu vzniká na rozhraní těchto proudů tření, které izoluje odsávaný proud od okolí a tím zintenzivňuje odsávání okolo osy nástavce. Radiálně přiváděný vzduch navíc odvádí čistý vzduch z oblasti za sacím nástavcem. Proto systém pracuje s vyššími koncentracemi škodlivin v odsávaném vzduchu a také s menšími objemovými toky odsávaného vzduchu. Oproti tradičnímu systému je systém REEXS ekonomičtější a více efektivní [6].

Pro správnou funkci zesíleného sacího nástavce, která je popsána výše, je třeba, aby výtoková rychlost neklesla pod minimální hodnotu, tzv. kritickou rychlost  $w_{kr}$ . V takovém případě by byl zesílený odsávací systém dokonce méně účinný než tradiční odsávací systém, protože by došlo k okamžitému odsávání přiváděného proudu vzduchu (v tomto případě hovoříme o tzv. zkratu). Dojde-li naopak ke značnému zvýšení výtokové rychlosti, zvětší se sice dosah proudu, ale zároveň se zmenší šířka účinné oblasti, neboť přiváděný vzduch strhává větší množství vzduchu před nástavcem [4].



Obr. 4.10 Grafické porovnání funkčnosti běžného odsávacího zařízení a Aabergova sacího nástavce

Nejdůležitější charakteristikou zesíleného odsávacího systému je parametr  $I$  (poměr průtokových hybností přiváděného a odsávaného vzduchu), na němž je závislá účinnost odsávání a je dán vztahem:

$$I = \frac{\dot{m}_2 \cdot u_2}{\dot{m}_1 \cdot w_1} \quad (4.4)$$

$\dot{m}_2$  ... hmotnostní tok přiváděného vzduchu

$\dot{m}_1$  ... hmotnostní tok odsávaného vzduchu

$u_2$  ... výtoková rychlost radiálního proudu vzduchu

$w_1$  ... rychlost odsávaného vzduchu ve vstupním průřezu

Z dříve provedených výzkumů Pedersena a Nielsena vyplývá, že minimální hodnota parametru  $I$  nutná pro vznik žádaného proudového pole je  $I=0,1$  (při této hodnotě již nemůže dojít ke zkratu-viz výše). Optimální hodnota parametru  $I$  byla pak Saundersem a Fletcherem stanovena jako  $I=0,6$  [6].

Pro dosažení optimálních hodnot parametru  $I$  je třeba změnit buď objemový tok přiváděného a odváděného vzduchu nebo šířku štěrbinu pro přívod vzduchu. Změna šířky štěrbinu je však možná jen v určitých mezích, neboť štěrbinu velmi malé šířky mají značnou tlakovou ztrátu a navíc jsou hlučné.

Vyváženou kombinací průtokových hybností přiváděného a odsávaného vzduchu je možné výrazně změnit tvar a velikost účinné oblasti odsávání před zesíleným sacím nástavcem, která je výrazně delší než u tradičního přírubového sacího nástavce. Výsledků výzkumu je možno využít např. ve svařovnách v automobilovém průmyslu obr. 4.11, kde velikost, tvarová různorodost a použití svařecích technologií mnohdy brání optimálnímu odsávání zdraví nebezpečných škodlivin tradičními sacími nástavci.



*Obr. 4.11 Využití Aabergova sacího nástavce v praxi [13]*

## 5 Metoda stopového plynu

Metoda stopového plynu slouží k simulaci vývinu škodlivin v pracovním prostředí pomocí přivádění stopového plynu. Při zjišťování účinnosti odsávání sacího nástavce se vychází z naměřených hodnot koncentrace stopového plynu podle vzorce:

$$\eta = \frac{C_1 - C_{po}}{C_{ref} - C_{po}} \quad (5.1)$$

$C_1$  ... koncentrace stopového plynu v odsávaném vzduchu

$C_{po}$  ... koncentrace stopového plynu v pozadí

$C_{ref}$  ... koncentrace referenční (odpovídá 100% zachycení stopového plynu)

Zařízení pro měření metodou stopového plynu tvoří tři samostatné části, jejichž vhodný výběr je nezbytný pro správnou funkci měřicí tratě [8]:

- zařízení pro přívod stopového plynu
- zařízení pro odběr vzorků
- analyzátor plynů

## 5.1 Zařízení pro přívod stopového plynu

Zařízení pro přívod stopového plynu umožňuje dodávat přesné množství stopového plynu do příslušného místa v odsávaném prostoru. Způsoby přivádění stopového plynu do měřeného místa:

- jednorázovým stříknutím
- kontrolovaným hmotnostním tokem
- konstantním hmotnostním tokem

## 5.2 Zařízení pro odběr vzorků

Zařízení pro odběr vzorků umožňuje odebírat vzorky vzduchu z určitých míst v měřicím prostoru. Vzorky vzduchu můžeme odebírat:

- jednorázově – používá se metoda nahodilého vzorkování tzn. při dosažení rovnoměrné koncentrace se z měřeného prostoru odebere vzorek
- pasivně – spočívá v absorpci plynu porézním materiálem
- průběžně – provádí se pomocí trubiček, které přivádí vzduch z měřené oblasti k analyzátoru. Trubičky musí být vzduchotěsné a nesmí absorbovat žádný stopový plyn. Průměr trubiček se pohybuje od několika milimetrů do jednoho centimetru. Z důvodu omezení tlakových ztrát a hluku, rychlosti v odběrové síti nepřesahují 5 m/s. Vzorek vzduchu se nasává do analyzátoru pomocí ventilátoru, který může být buď samostatný, nebo je součástí analyzátoru.

## 5.3 Analyzátor plynů

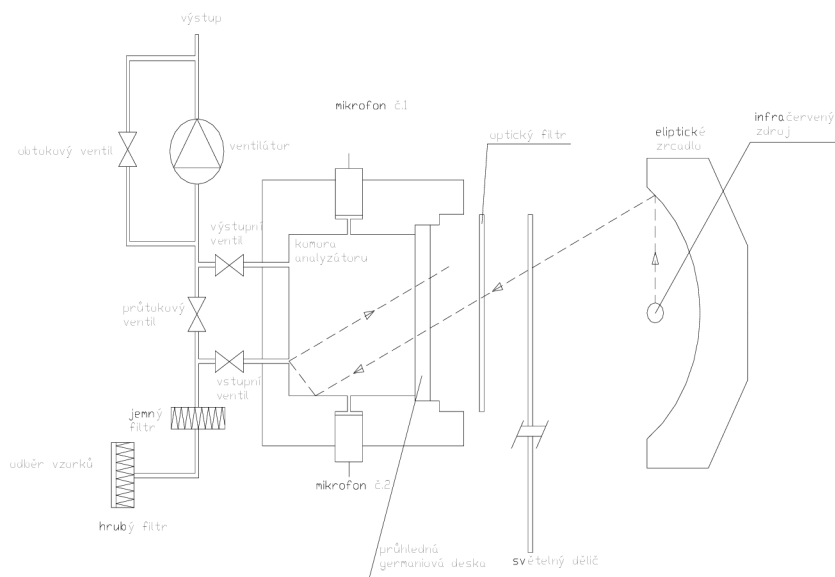
Analyzátor plynů umožňuje měřit koncentrace přiváděného stopového plynu ve vzorku vzduchu odebraného v měřeném prostoru. Analyzátor musí být dostatečně citlivý, aby se pracovalo s co nejmenším množstvím stopového plynu. Měření by neměla ovlivňovat plyny přítomné ve vzduchu ve velkých koncentracích (dusík, kyslík, vodní pára a další). Čas potřebný k vyhodnocení vzorku vzduchu se liší dle typu analyzátoru a pohybuje se od několik milisekund po několik minut. Čím je rychlejší vyhodnocení, tím častější může být odběr vzorků a tím je podrobnější monitorování dané oblasti.

Jednotlivé principy měření koncentrace stopového plynu se liší podle druhu analyzovaného stopového plynu, rozsahem koncentrací, které jsou schopny měřit, přesností, rychlostí vyhodnocení, snadností měření a cenou analyzátoru.

Podle měřicího principu lze analyzátory plynů rozdělit na:

- chemické
- fyzikální

V mém případě je použit fyzikální analyzátor na principu fotoakustické spektroskopie (PAS). Jde o velmi přesnou metodu pro měření velmi malých koncentrací plynu. Princip fotoakustické spektroskopie spočívá v ozařování vzorku plynu přerušovaným infračerveným zářením s nastavenou vlnovou délkou. Molekuly plynu pohlcují část světelné energie a přeměňují ji na akustický signál, který je snímán dvěma mikrofony. Elektrické signály vystupující z obou mikrofonů jsou vedeny na zesilovač a výsledný signál je elektronicky zpracován [4]. Schéma měřicího přístroje je znázorněno na obr. 5.1.



Obr. 5.1 Schéma fotoakustické infračervené metody [4]

### 5.3.1 Cyklus měření koncentrace stopového plynu ve vzorku vzduchu

Cyklus měření koncentrace stopového plynu ve vzorku vzduchu:

- Ventilátor v okamžiku vzorkování vypustí „starý“ vzorek vzduchu v měřicím systému a nahradí ho „novým“ vzorkem. Před vstupem do měřicího systému prochází vzorek dvěma filtry.
- Nový vzorek vzduchu je hermeticky uzavřen v komoře analyzátoru ventily. Infračervené světlo ze zdroje projde přes dělič světla a pak přes jeden z optických filtrů v kotouči do odrazivé komory analyzátoru.
- Dva mikrofony ve stěně komory měří akustický signál, generovaný v komoře analyzátoru průchodem pulsujícího záření (pulsování je způsobeno světelným děličem). Tento signál je přímo úměrný koncentraci sledovaného plynu v komoře.
- Kotouč osazený filtry se otočí tak, aby světlo procházelo přes další optický filtr a měří se nový signál odpovídající koncentraci dalšího stopového plynu. Tento krok se opakuje podle počtu měřených plynů.

### 5.3.2 Použití metody stopového plynu

Měření metodou stopového plynu lze využít na řešení řady problémů v technice prostředí, zejména v oblasti větrání. Metoda stopového plynu se využívá například při:

- Zjišťování účinnosti výměny vzduchu v místnostech. Zde se měří koncentrace stopového plynu v různých místech větraného prostoru a z ní se usuzuje na obrazy proudění v místnosti. Z hygienického hlediska není důležité znát přesné rozložení rychlostí v daném prostoru, ale spíše koncentrace škodlivin a tuto informaci měření metodou stopového plynu přímo poskytuje. Z rozložení koncentrace stopového plynu v měřené oblasti můžeme přímo odhalit oblasti, kde k provětrávání nedochází (tzv. mrtvé kouty)



- Při stanovení množství energie, které je zapotřebí pro ohřev či chlazení venkovního vzduchu vnikajícího do místnosti infiltrací. V tomto případě se přivede do místnosti určité množství stopového plynu a vyrovná se rozložení koncentrací promícháním. Při infiltraci venkovního vzduchu se koncentrace stopového plynu snižuje úměrně s množstvím infiltrovaného vzduchu. Druhou možností je udržování stálé koncentrace stopového plynu v místnosti. Hmotnostní tok venkovního vzduchu vnikajícího do místnosti je potom úměrný hmotnostnímu toku přiváděného stopového plynu
- Pro měření hmotnostního toku vzduchu ve vzduchovodu. V tomto případě je do vzduchovodu nainstalován zdroj stopového plynu. Za zdrojem stopového plynu je umístěn víříč, který slouží ke zrovnoměření průběhu koncentrace v průřezu vzduchovodu. Za víříčem je umístěno zařízení pro odběr vzorků, které přivádí vzorky do analyzátoru. Ze známé hodnoty přiváděného množství stopového plynu a jeho koncentrace ve vzorku vzduchu je možné určit hmotnostní tok vzduchu vzduchovodem
- Při sledování, zda se škodliviny generované v určitém prostoru šíří do okolních prostorů, kde by mohly být škodlivé či nebezpečné. Stopový plyn v tomto případě nahrazuje unikající škodlivinu a sleduje se jeho šíření po budově
- Pro měření účinnosti lokálního odsávání škodlivin přímo z místa jejich vzniku. Škodlivinu v tomto případě opět simuluje vhodný stopový plyn. Vlastní měření je pak již velmi jednoduché a vyžaduje pouze měření množství přiváděné škodliviny (stopového plynu) a koncentrace stopového plynu v odsávaném vzduchu a v pozadí [4]

Princip metody je jednoduchý, proto je možné i výsledky získávat relativně rychle, což umožňuje aplikovat tuto metodu na proudění vzduchu v místnostech.

### 5.3.3 Podmínky pro volbu stopového plynu

Metodu stopového plynu nejvíce ovlivňuje volba vhodného stopového plynu [11]. Stopový plyn by měl splňovat následující kritéria:

- **bezpečnost:**
  - stopový plyn nesmí být hořlavý, výbušný, toxický;
  - stopový plyn by měl být bez zápachu a dalších škodlivých účinků na zdraví člověka v koncentracích použitých při měření
- **neovlivnění měření koncentrací:**
  - plyn se nesmí rozkládat, nebo jinak reagovat při styku se vzduchem, nesmí být absorbován vnitřním vybavením v budovách;
  - koncentrace plynu ve vzduchu by měla být snadno měřitelná v rámci požadované přesnosti;
  - stopový plyn je tím výhodnější, čím jsou jeho přirozené koncentrace ve vzduchu nižší;
  - stopový plyn by měl být levný s ohledem na jeho množství potřebné pro měření
- **hustota:** v případě, že měříme účinnost odsávání, měla by se hustota stopového plynu co nejvíce blížit hustotě látky, kterou stopový plyn zastupuje tzn. hustotě předpokládané škodliviny. Jestliže určujeme kvalitu větrání, hustota stopového plynu by se měla blížit hustotě vzduchu
- **koncentrace:** limitní koncentrace stopového plynu ve vzduchu je možné posuzovat ze dvou hledisek. Jednak, aby nedocházelo k ovlivnění obrazu proudění přítomností stopového plynu ve vzduchu a jednak z bezpečnostního a hygienického hlediska

Nejvhodnější plyny pro použití metody stopového plynu jsou např.:

oxid uhličitý .....CO<sub>2</sub>  
 fluorid sírový .....SF<sub>6</sub>

oxid dusný .....N<sub>2</sub>O  
freon 12 .....CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> a halogenové uhlovodíky.

Pro měření účinnosti odsávání, v této diplomové práci, byl použit jako stopový plyn oxid uhličitý CO<sub>2</sub>.

Oxid uhličitý je charakterizován jako plyn bez barvy, bez chuti a bez zápachu. Jeho hustota je vyšší než hustota vzduchu. Hustota CO<sub>2</sub> je při teplotě 20 °C a tlaku 101,3 kPa 1,977 kg·m<sup>-3</sup>. Teplota tání při tlaku 500 kPa je -56,6 °C, teplota sublimace je -78,5°C.

## 6 Experimentální zařízení

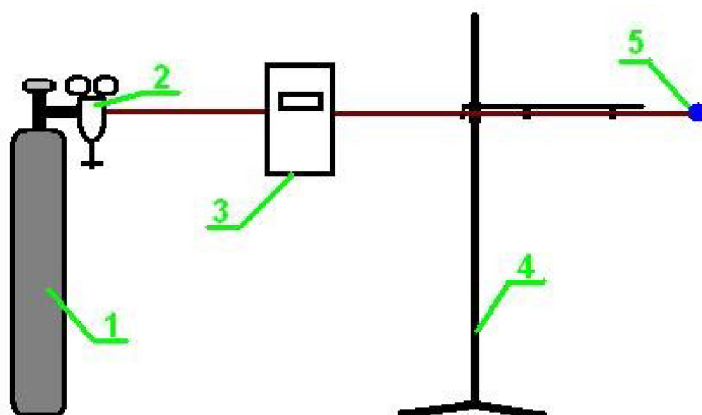
Experimentální zařízení použité při mém měření účinnosti odsávání zesíleného štěrbinového sacího nástavce je tvořeno odváděcí a přiváděcí větví viz obr. 6.1. Větev odváděcí tvoří novodurová trubka o průměru 108 mm, jenž je propojena s odsávací štěrbinou sacího nástavce. V novodurové trubce je vložen víříč zabezpečující stejnoměrné rozložení koncentrace stopového plynu v odsávaném vzduchu po celé ploše průřezu. Za víříčem je teflonová trubička, která slouží k odběru vzorků. Za víříčem je také připojen plovákový průtokoměr typu MFE 80, za nimž je umístěn odsávací ventilátor typu Eta, který je určen pro použití do centrálních vysavačů. Ventilátor odsává směs vzduchu a stopového plynu, kterou vyfukuje ven z měřicí místnosti. Přiváděcí větev je tvořena ventilátorem opět typu Eta. Za ventilátorem je plovákový průtokoměr, který je stejného typu jako na odváděcí větve. Na ventilátor navazuje novodurová trubka průměru 63 mm, která ústí do přiváděcí štěrbinou sacího nástavce.

Pro měření metodou stopového plynu je experimentální zařízení vybaveno zařízením pro přívod stopového plynu, odběrem vzorků směsi vzduchu a stopového plynu a analyzátozem plynů.

Zařízení pro přívod stopového plynu je tvořeno tlakovou lahví se stopovým plynem, tlakovou hadicí a průtokoměrem cejchovaným pro plyn CO<sub>2</sub>. Pro zakončení zdroje stopového plynu je použita porézní kulička o průměru 28 mm, která dostatečně nahrazuje všesměrový zdroj plynu. Všesměrový zdroj se pro přívod stopového plynu v daném případě jeví jako nejvýhodnější. Schéma vlastní sestavy pro přívod stopového plynu je na obr. 6.2.

Zařízení pro odběr vzorků je tvořeno teflonovými trubičkami o vnitřním průměru 3mm. Teflonové trubičky jsou vzduchotěsné a neabsorbují žádné plyny. Vzorky vzduchu jsou dopravovány do analyzátoru pomocí ventilátoru, který je přímo součástí analyzátoru plynů.





Obr. 6.2: Schéma sestavy pro přívod stopového plynu [12]

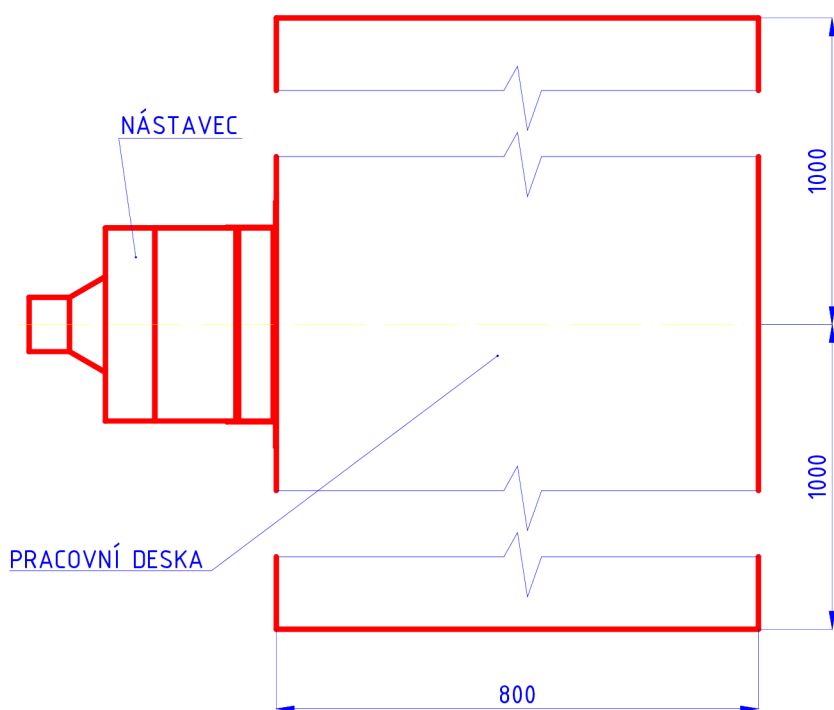
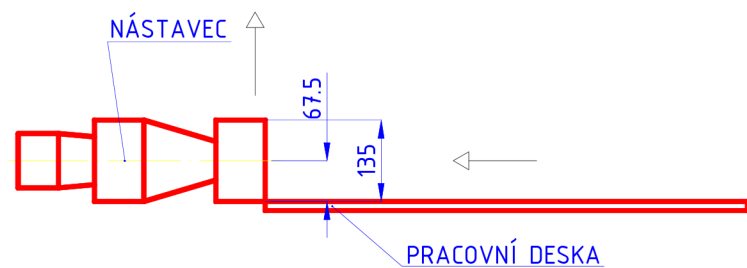
- 1 – tlaková nádoba se stopovým plynem (CO<sub>2</sub>)
- 2 – redukční ventil
- 3 – plovákový průtokoměr MLW, typ LD 100
- 4 – stavitelný stojan
- 5 – porézní kulička

Čas měření koncentrace je asi 35 s pro jeden plyn, nebo vodní páru, nebo 120 s měří-li se koncentrace pěti plynů a vodní páru. Z hlediska rychlosti měření je také důležité, aby místo odběru nebylo od analyzátoru příliš vzdáleno. S rostoucí vzdáleností analyzátoru od místa odběru se zvyšuje čas na přívod nového vzorku vzduchu a tím i čas potřebný pro měření koncentrace stopového plynu [4].



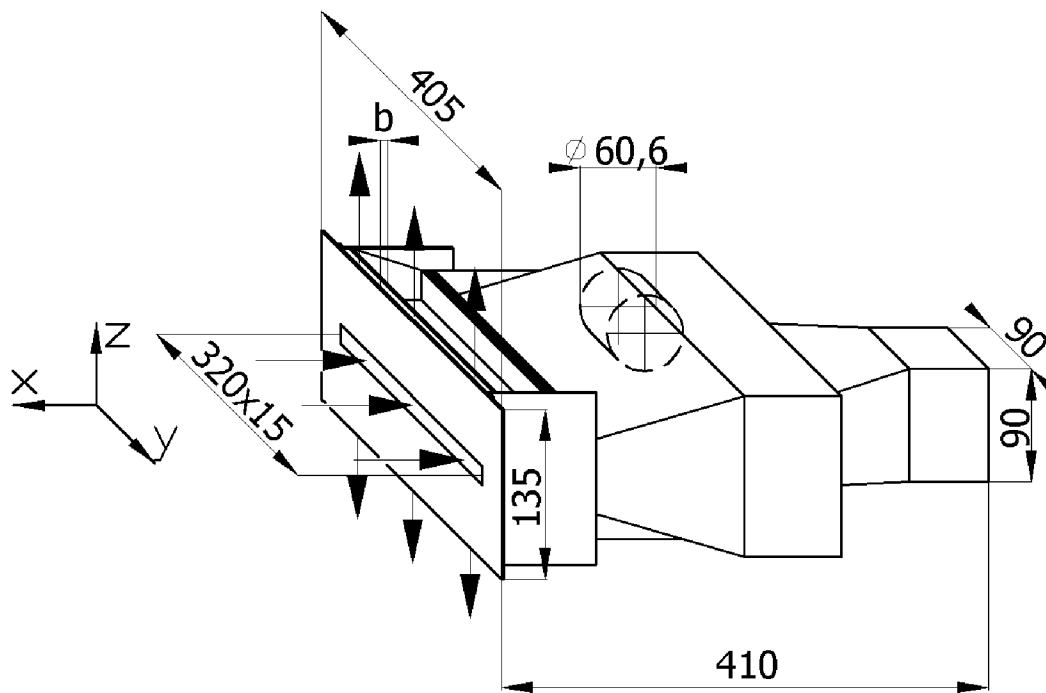
Obr. 6.3 Multi-gas monitor typ 1302 od firmy Brüel & Kjaer [12]

Účinnost zesíleného šterbinového sacího nástavce je proměřována v kombinaci s pracovním stolem, a proto pod jeho spodní hranou je umístěna deska daného stolu. Pracovní stůl umístěný u nástavce má délku před nástavcem 800 mm. Přesná poloha pracovního stolu vůči sacímu nástavci je patrná z obr. 6.4.



*obr. 6.4 Odsávací nástavec zakotovaný vůči pracovnímu stolu*

Zkoumaný zesílený štěrbinový sací nástavec včetně hlavních rozměrů je uveden na obr.6.5.



obr. 6.5 Štěrbínový zesílený odsávací nástavec [4]

Základní rozměry zesíleného nástavce jsou tyto:

- |   |                  |                    |                          |
|---|------------------|--------------------|--------------------------|
| - | čelní příruba:   | - délka            | - 0,405 m                |
|   |                  | - výška (šířka)    | - 0,135 m                |
| - | odsávací štěrba  | - délka            | - 0,320 m                |
|   |                  | - šířka (výška)    | - 0,015 m                |
|   |                  | - plocha ( $S_2$ ) | - 0,0048 m <sup>2</sup>  |
| - | příváděcí štěrba | - délka            | - 0,320 m                |
|   |                  | - šířka            | - 0,004 m                |
|   |                  | - plocha ( $S_1$ ) | - 0,00128 m <sup>2</sup> |

Pro stanovení účinnosti odsávání zesíleného sacího nástavce je důležité znát přesnou teplotu a tlak na několika místech experimentálního zařízení. Proto jsou v soustavě zařazeny termočlánky, které jsou přes moduly ADAM 4018 propojeny s PC a zaznamenávány speciálním programem. Termočlánky jsou umístěny pro měření teplot na těchto místech: teplota odsávaného vzduchu v odsávacím potrubí před průtokoměrem, teplota přiváděného vzduchu v příváděcím potrubí před průtokoměrem, teplota stopového plynu CO<sub>2</sub> před průtokoměrem, teplota přiváděného vzduchu měřená v příváděcí štěrbině zesíleného nástavce, poslední termočlánek měří teplotu vzduchu v okolním prostoru ( $T_{ok}$ ).

Na další modul ADAM 4018 jsou připojené převodníky tlaku s lineární charakteristikou. Jsou zde tři tyto převodníky. Tlak vzduchu v přívodním a v odsávacím potrubí měří dva převodníky s rozsahem 0 až 2,5 kPa. Třetí převodník měří tlak v přívodu stopového plynu a jeho rozsah je 0 až 20 kPa.

Modul ADAM 4520 (obr. 6.6) přijímá informace o teplotách a tlacích od ostatních dvou modulů ADAM a převádí je přes připojení do PC, ve kterém jsou průběhy hodnot zaznamenávány programem a ukládány do paměti.



*Obr.6.6: Převodníky tlaku AIRFLOW a moduly ADAM [12]*

Pro měření barometrického tlaku slouží při měření digitální barometr firmy AIRFLOW typ DB2 (obr. 6.7), který má měřící rozsah 0 až 2000 mbar.



*Obr.6.7: AIRFLOW typ DB2*

## 7 Měření účinnosti odsávání a jejich výsledky

### 7.1 Stanovení účinnosti sacího nástavce

Jedním z úkolů této diplomové práce bylo stanovení účinnosti odsávání štěrbinového sacího nástavce, v kombinaci s pracovním stolem, pomocí metody stopového plynu (viz výše). Účinnost odsávání  $\eta$  je definována vztahem:

$$\eta = \frac{C_1 - C_{po}}{C_{ref} - C_{po}} = \frac{C_1 - C_{rpo}}{C_{rpo}} \quad (7.1)$$

$C_1$  ... koncentrace stopového plynu v odsávaném vzduchu

$C_{po}$  ... koncentrace stopového plynu v pozadí

$C_{ref}$  ... koncentrace referenční (odpovídá 100% zachycení stopového plynu)

$C_{rpo}$  ... hodnota referenční koncentrace stopového plynu bez pozadí

Pro stanovení účinnosti odsávání dle vztahu (7.1) je nejprve třeba stanovit koncentraci, která odpovídá 100% zachycení stopového plynu, tzv. referenční koncentraci stopového plynu  $C_{ref}$ . Tato koncentrace se stanoví umístěním zdroje stopového plynu do odsávací štěrbině, čímž zaručíme odsání veškerého stopového plynu (tedy účinnost odsávání v tomto případě je rovna 100%). Střední hodnota referenční koncentrace stopového plynu bez koncentrace v pozadí  $C_{rpo}$  pro odsávaný objemový tok vzduchu  $\dot{V}_1 = 208 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  a objemový tok stopového plynu  $\text{CO}_2$   $\dot{V}_{\text{CO}_2} = 72 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$  při střední teplotě stopového plynu  $26 \text{ }^\circ\text{C}$  je 400 ppm.

Při měření koncentrace stopového plynu v odsávaném vzduchu  $C_1$  byl všesměrový zdroj stopového plynu přemísťován po zvolené obdelníkové síti bodů, jejichž vzdálenost činila 30 mm a 65 mm.

Jelikož koncentrace  $\text{CO}_2$  v pozadí narůstá díky nedokonalému zachycování stopového plynu sacím nástavcem a díky produkci tohoto plynu obsluhou, jejíž přítomnost při měření je nezbytná, je třeba při každém měření koncentrace stopového plynu v odsávaném vzduchu  $C_1$  měřit i hodnotu koncentrace  $\text{CO}_2$  v pozadí  $C_{po}$ .

### 7.2 Podmínky měření účinnosti sacího nástavce

Pro měření účinnosti sacího nástavce byla použita síť bodů, která simuluje kartézský souřadný systém, jehož počátek byl umístěn do středu odsávací štěrbině sacího nástavce. Účinnost nástavce jsem měřil pro šířku štěrbině přivodního vzduchu  $b = 4 \text{ mm}$ . Objemový tok odsávaného vzduchu jsem volil s ohledem na optimální rychlost v odsávací štěrbině  $w_1 = 12,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Při této rychlosti je objemový tok odsávaného vzduchu  $\dot{V}_1 = 208 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Měření účinnosti sacího nástavce ve vertikální rovině procházející osou sacího nástavce jsem provedl pro režim tradičního odsávání ( $I = 0$ ) a pro různé režimy odsávání zesíleného ( $I = 0,3; 0,6$  a  $0,9$ ). Měření účinnosti odsávání v horizontální rovině procházející osou sacího nástavce bylo provedeno pro režim tradičního odsávání ( $I = 0$ ) a pro režim zesíleného odsávání ( $I = 0,6$ ). Objemové toky přiváděného vzduchu jsou uvedeny v tab. 7.1.



Tab. 7.1 Velikosti objemových toků přiváděného vzduchu pro různé hodnoty  $I$  při objemovém toku odsávaného vzduchu  $208 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

$I$	[-]	0	0,3	0,6	0,9
$\dot{V}_2$	$[\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$	0	86	122	149

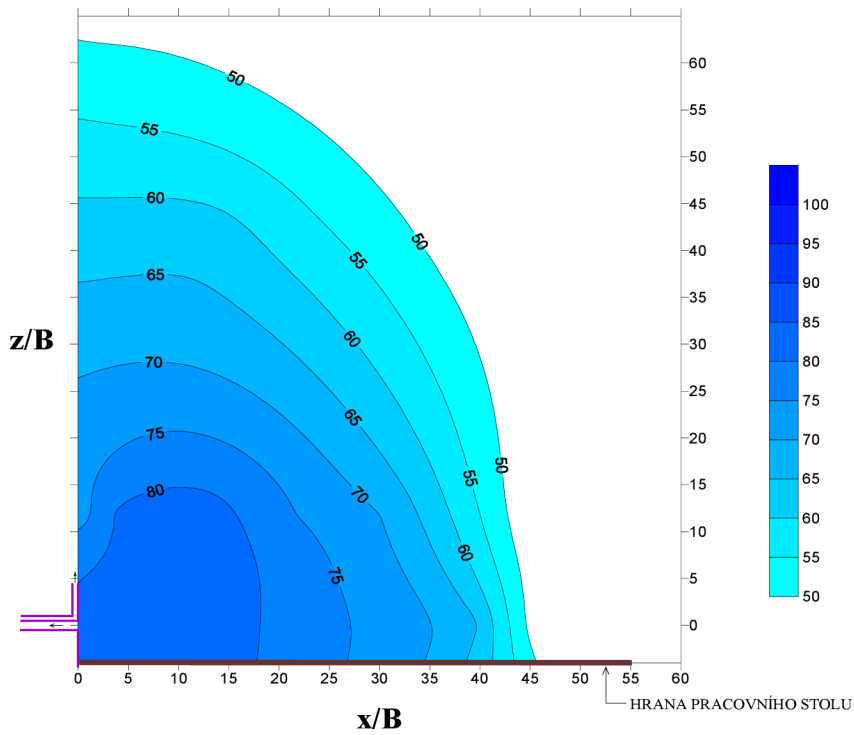
Pro každý z těchto režimů jsem provedl měření v bodech před šterbinou sacího nástavce ve vertikální a horizontální rovině procházející počátkem zvoleného souřadnicového systému. Body, do kterých byl zdroj stopového plynu umístován, vytváří rovnoměrnou síť s roztečí 30 mm. Pro každý bod byla koncentrace v pozadí měřena 3 krát a koncentrace stopového plynu v odsávaném vzduchu 3 krát. Z těchto naměřených hodnot jsem stanovil jejich střední hodnoty a ty jsem použil pro výpočet účinnosti odsávání. V každé rovině bylo naměřeno 17 až 33 bodů dle velikosti oblastí účinnosti odsávání pohybujících se v hodnotách od 100% do 50%.

### 7.3 Výsledky měření účinnosti odsávání

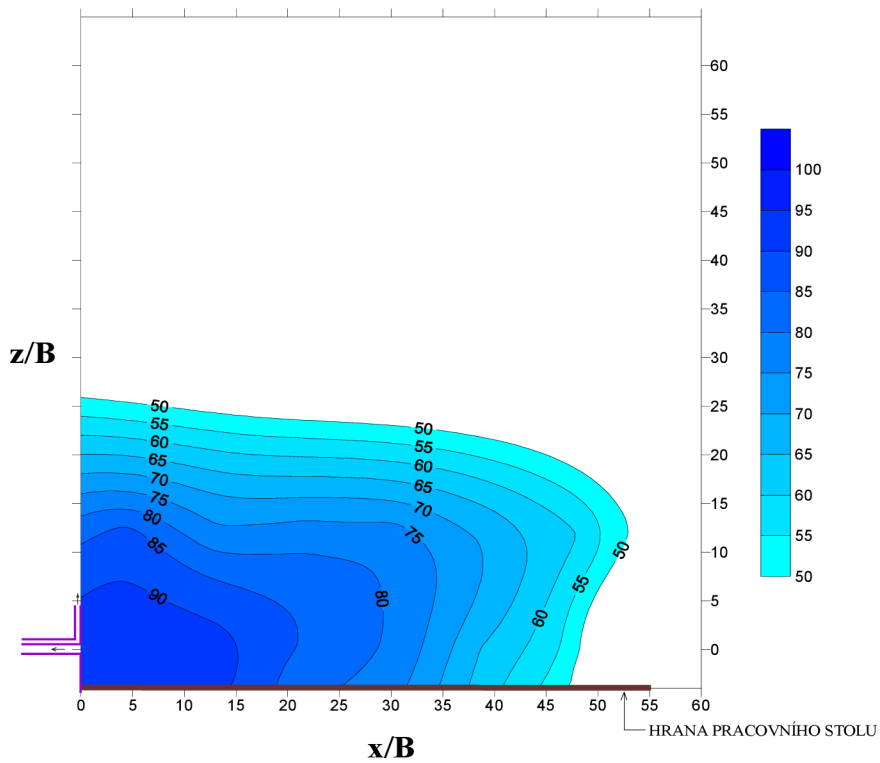
Číselné hodnoty naměřených koncentrací jsou uvedeny v příloze P1 v tab. 1 až 6. V tabulkách přílohy P1 jsou uvedeny hodnoty teplot  $t_1$  před průtokoměrem v odsávací větvi,  $t_2$  před průtokoměrem v přívodní větvi a  $t_4$  v přívodní šterbině. Dále jsou zde uvedeny podtlaky  $\Delta p_1$  v odsávací větvi měřené před průtokoměrem a přetlaky  $\Delta p_2$  v přívodní větvi měřené před průtokoměrem. V tabulkách jsou také uvedeny střední hodnoty koncentrací v odsávaném vzduchu  $\bar{C}_1$ , koncentrací stopového plynu v pozadí  $\bar{C}_{po}$ , referenční koncentrace stopového plynu  $\bar{C}_{ref}$  a hodnoty účinnosti odsávání a jejich směrodatné odchylky  $\bar{\sigma}_\eta$  v jednotlivých proměřovaných bodech.

Zpracování hodnot účinnosti odsávání je provedeno do následujících grafů pomocí programu SURFER 7. Jedná se o flexibilní topografický program využívaný hlavně pro tvorbu map. V tomto softwaru byly naměřenými body proloženy izočáry účinnosti odsávání v intervalu 50% až 100% s krokem 5%.

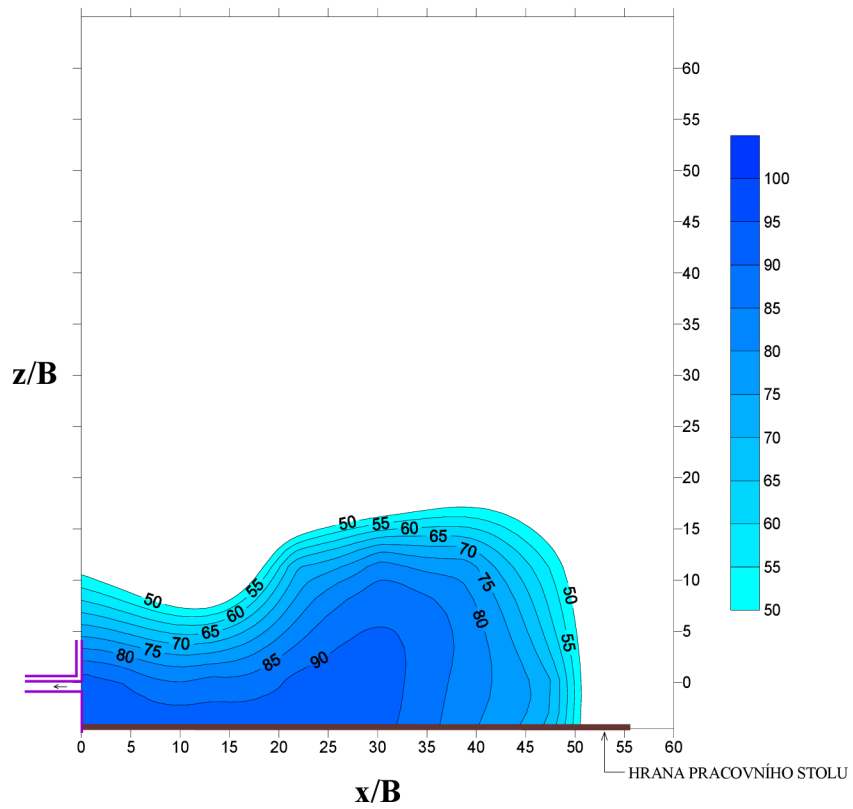
V následujících grafech (obr. 7.1 až obr. 7.6) je znázorněno rozložení účinnosti odsávání v prostoru před šterbinovým sacím nástavcem při různých režimech odsávání. Grafy jsou vynášeny v poměrných souřadnicích  $x/B$ ,  $y/B$  a  $z/B$ , kde  $B$  je šířka odsávací šterbiny,  $x$  je vzdálenost od čela odsávacího otvoru ve směru osy nástavce,  $y$  je vzdálenost od vertikální roviny procházející osou sacího nástavce a  $z$  je vzdálenost od horizontální roviny procházející osou sacího nástavce. (viz obr. 6.5)



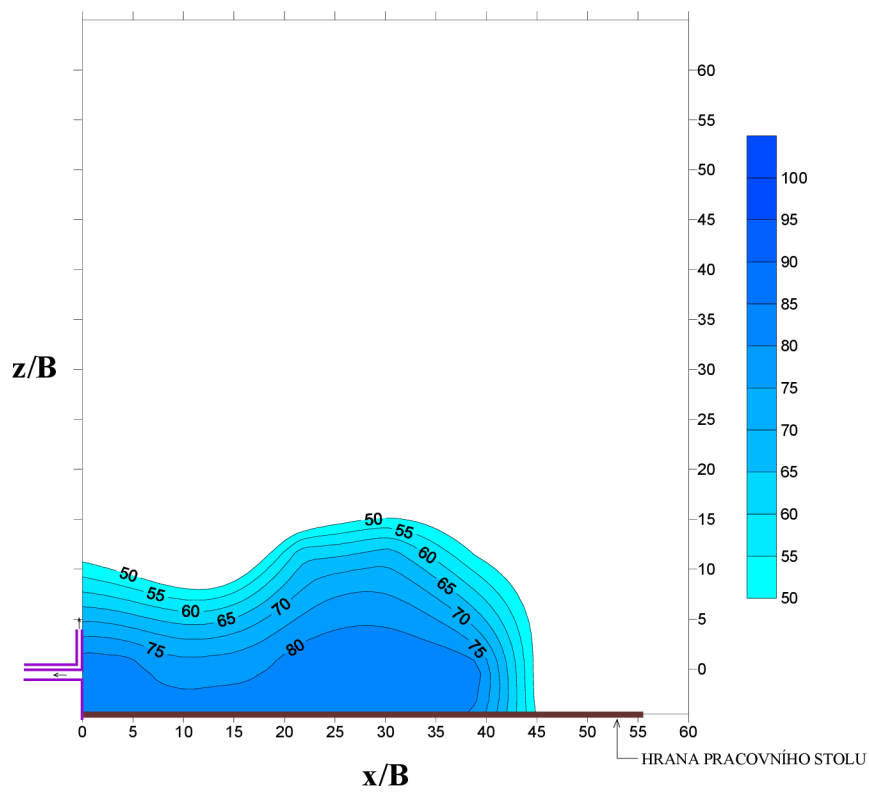
Obr.7.1 Účinnost odsávání ve vertikální rovině ( $y = 0$ ) pro  $I = 0$  a  $w_1 = 12 \text{ m.s}^{-1}$



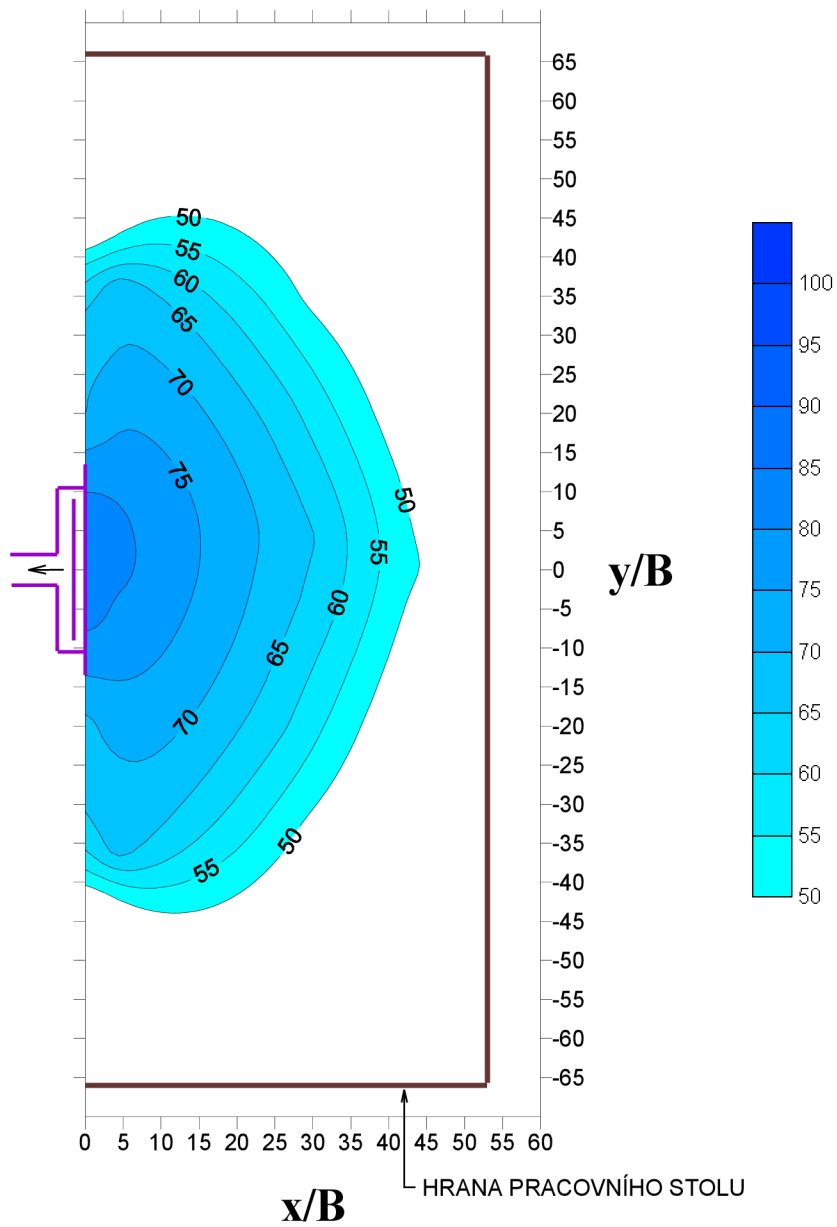
Obr. 7.2 Účinnost odsávání ve vertikální rovině ( $y = 0$ ) pro  $I = 0,3$  a  $w_1 = 12 \text{ m.s}^{-1}$



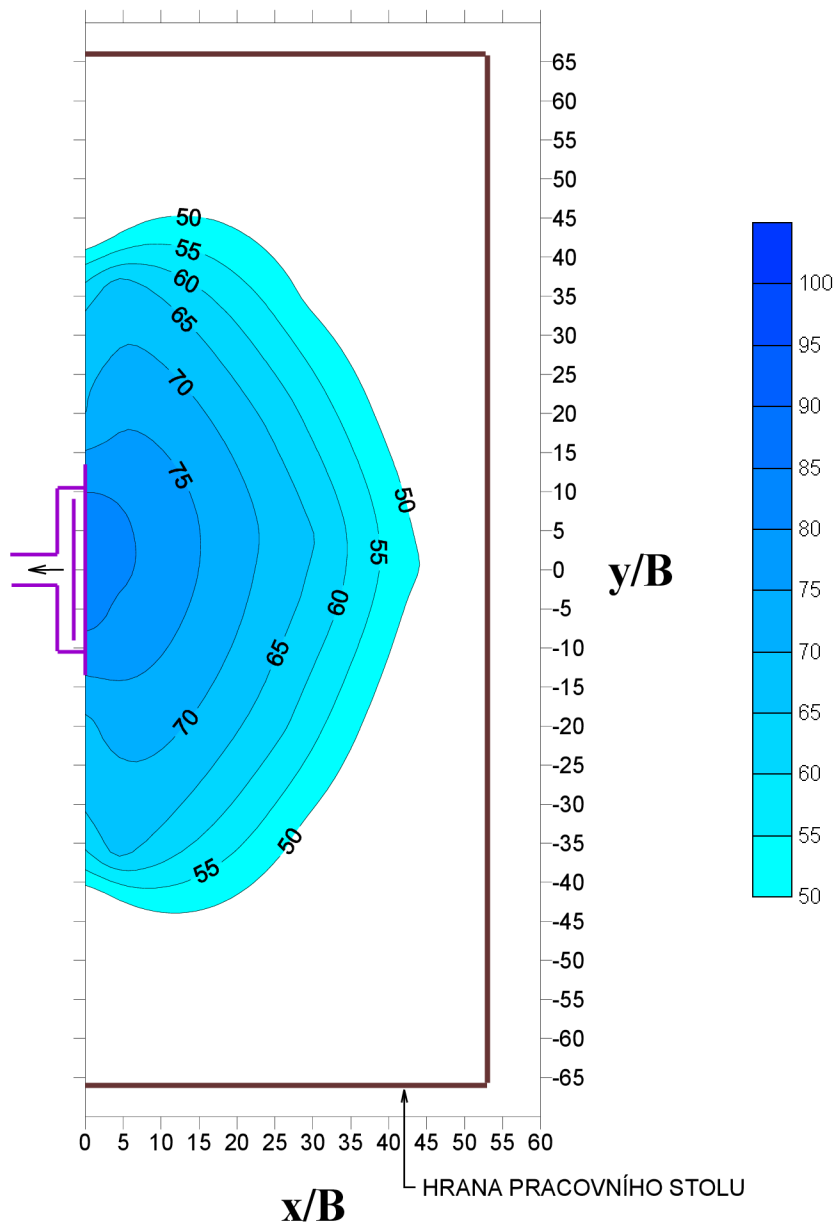
Obr. 7.3 Účinnost odsávání ve vertikální rovině ( $y = 0$ ) pro  $I = 0,6$  a  $w_1 = 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



Obr. 7.4 Účinnost odsávání ve vertikální rovině ( $y = 0$ ) pro  $I = 0,9$  a  $w_1 = 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



Obr. 7.5 Účinnost odsávání v horizontální rovině ( $z = 0$ ) pro  $I = 0$  a  $w_1 = 12 \text{ m.s}^{-1}$



Obr. 7.6 Účinnost odsávání v horizontální rovině ( $z = 0$ ) pro  $I = 0,6$  a  $w_1 = 12 \text{ m.s}^{-1}$

Z grafů je patrné, že tvar účinné oblasti odsávání se mění v závislosti na provozovaném režimu odsávání. Z výsledků naměřených v horizontální rovině v ose výstky (obr. 7.5 a 7.6) je při  $I=0,6$  účinná oblast definovaná účinností odsávání 50%, tj. hodnota  $x/B=50$  větší než při  $I=0$  hodnota  $x/B=42$ . Při  $I=0,6$  je také patrná oblast 90% účinnosti odsávání, která se při  $I=0$  vůbec nevyskytuje. Na izočarách účinnosti odsávání ve vertikální rovině (obr. 7.1 až 7.4) je patrné zúžení účinné oblasti vlivem přivádění vzduchu. Dále je vidět velká a dlouhá oblast 90% účinnosti při  $I=0,6$ , kde je však už patrné značné zúžení oblastí s nižší účinností.

## 8 Rozbor nejistot měření

Při každém měření musíme brát ohled na to, že naměřené údaje jsou zatíženy chybami. Chyby můžeme rozdělit na nejistoty čidel, nejistoty přístrojů, nejistoty převodníků signálů,

chyby obsluhy, chyby zvolené metody, chyby umístění čidel, chyby způsobené okolním prostředím, chyby zpracování měření apod. [7]

## 8.1 Chyby a nejistoty měření

Z hlediska matematické definice dělíme chyby na absolutní a relativní. Absolutní chyba  $\varepsilon$  je odchylka naměřené hodnoty  $y$  od předpokládané správné hodnoty  $y^*$  a je dána vztahem:

$$\varepsilon = y - y^* . \quad (8.1)$$

Jednotka chyby je, stejná jako jednotka dané měřené hodnoty. Nikdy nemůžeme určit správnou hodnotu, a tak ji nahrazujeme nejpravděpodobnější hodnotou, určenou např. jako střední hodnotu (aritmetický průměr).

Relativní chyba je bezrozměrná, často se uvádí v procentech, a je definována vztahem:

$$\eta = \frac{\varepsilon}{y^*} . \quad (8.2)$$

**Z hlediska možnosti odstranění chyb je můžeme dělit na:**

### Hrubé chyby

Jsou to chyby, které jsou způsobené omylem nebo nepozorností obsluhy, neznalostí metod měření, nebo poškozením měřícího zařízení. Vyznačují se především tím, že jsou velmi odlišné od ostatních naměřených hodnot, a proto je lze obvykle snadno identifikovat a z měření vyloučit.

### Systematické chyby

Mohou být způsobené nevhodně zvolenou měřicí metodou, chybnou měřicí aparaturou, neznalostí či nedostatečnými schopnostmi obsluhy, apod. Tyto chyby lze identifikovat porovnáním naměřených hodnot s výsledky měření jinou metodou, odhalením chování měřícího zařízení, nebo rozбором zvolené metody měření či přístupu obsluhy k měření. Po zachycení těchto chyb lze tyto odchylky korigovat. Korekční hodnoty se přičítají k nekorigovaným výsledným hodnotám měření a tím se systematické chyby kompenzují.

### Nahodilé chyby

Vznikají především nekontrolovatelným působením celé řady vlivů. Těmto chybám nelze obvykle vzhledem k jejich charakteru zabránit, ani je nelze korigovat. Po rozboru podmínek měření je někdy možné určit jejich zdroj a tento zdroj minimalizovat. Zjistitelné zdroje jsou například nahodilé vlivy okolí, nekvalitní příprava a průběh měření. Z výše uvedeného plyne, že výsledky měření budou po korigování systematických a vyloučení hrubých chyb stále zatíženy chybami nahodilými.

#### 8.1.1 Přímá měření

Nahodilé chyby přímých měření nezávislých veličin se snažíme vyjádřit pomocí zákonů matematické statistiky.

Největší dovolená chyba přístroje  $\varepsilon_m$  uváděná výrobcem je obvykle totožná s hodnotou krajní odchylky  $\kappa$ . Pro pravděpodobnost, že 99,7% naměřených hodnot na stejném objektu, stejným přístrojem, bude spadat do tolerančního pole  $\pm \kappa$  kolem nejpravděpodobnější hodnoty  $y^*$  platí vztah:

$$\kappa = \varepsilon_m = 3\sigma \Rightarrow \sigma = \frac{\varepsilon_m}{3}, \quad (8.3)$$

kde  $\sigma$  představuje výběrovou směrodatnou odchylku.

### Jedno měření

Chybu není možné vypočítat z vlastního procesu jednoho měření, ale pro dané měření lze použít například chybu z předchozích měření stejným přístrojem, nebo chybu zjištěnou cejchováním přístroje. Také lze tuto chybu ztotožnit s největší dovolenou chybou přístroje  $\varepsilon_m$ . Někdy se přesnost přístroje vyjadřuje pomocí tzv. třídy přesnosti  $T_p$  dané vztahem:

$$T_p = \frac{\varepsilon_m}{Y} \cdot 100 \quad (8.4)$$

$Y$  zde vyjadřuje měřící rozsah přístroje. Chyba  $\varepsilon_m$  a tedy i krajní odchylka se určuje ze vztahu (8.4). Třídy přesnosti se zaokrouhlují na nejbližší vyšší hodnotu z řady 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; a 5%.

### Opakovaná měření

Výběrová směrodatná odchylka jakéhokoliv jednoho z opakovaných měření lze určit dle vztahu:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}, \quad (8.5)$$

$n$  je počet opakovaných měření

$y_i$  jsou jednotlivé známé naměřené hodnoty

$\bar{y}$  je střední hodnota (aritmetický průměr) naměřených hodnot

Pro výběrovou směrodatnou odchylku střední hodnoty platí:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}{n(n-1)}}. \quad (8.6)$$

### 8.1.2 Nepřímá měření

Odchylky či nejistoty nepřímých měření nezávislých veličin jsou funkcí odchylek či nejistot jednotlivých veličin, ze kterých se výsledná veličina počítá. Je-li výsledná veličina  $y = f(a, b, c, \dots)$ , lze z teorie chyb určit směrodatnou odchylku (nejistotu) veličiny  $y$  ve tvaru:

$$\bar{\sigma}_y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a} \bar{\sigma}_a\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b} \bar{\sigma}_b\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial c} \bar{\sigma}_c\right)^2 + \dots} \quad (8.7)$$

kde  $\bar{\sigma}_a, \bar{\sigma}_b, \bar{\sigma}_c$  jsou výběrové směrodatné odchylky veličin  $a, b, c$  [7].

## 8.2 Stanovení chyb a nejistot při měření účinnosti odsávání

Při experimentálním výzkumu zesíleného odsávacího štěrbinového systému metodou stopového plynu se setkáme z řadou chyb a nejistot, které určují výslednou nejistotu účinnosti  $\eta$ . Nejdůležitějšími nejistotami je nastavení správných objemových průtoků vzduchu v odsávací  $\dot{V}_1$  a příváděcí  $\dot{V}_2$  větvi měřicí trati. Toto má za následek také nejistotu nastavení parametru poměru průtokových hybností  $I$ . Dalším faktorem, který má vliv na nejistotu měření účinnosti odsávání je nejistota správnosti nastavení průtoku stopového plynu  $\dot{V}_{CO_2}$ .

Další nejistotou je chyba nastavení polohy všesměrového zdroje stopového plynu. Poloha zdroje se nastavuje jak v rovině horizontální, tak v rovině vertikální. Pro horizontální rovinu se poloha zdroje určovala pomocí sítě bodů, odměřených a označených na desce, která představovala pracovní stůl. Změna polohy vertikální roviny je dána připravenými měrkami o smluvních délkách. Nejistoty plynoucí z nastavení polohy jsou dány chybou měřidla, kterým byla odměřena soustava bodů na pracovní desce a kterým byly odměřeny délky měrek. Dále jsou to nejistoty, které vznikají nepozorností a nepřesností obsluhy měřidla. V blízkosti sacího nástavce byla odhadnuta chyba na  $\pm 0,5\text{mm}$  a ve vzdálenosti cca 1m od sacího nástavce na  $\pm 2\text{mm}$ .

Výpočet nejistoty pro plochy odsávací štěrbin  $S_1$  a příváděcí štěrbin  $S_2$  zde nejsou uvedeny, jelikož jejich hodnoty jsou příliš malé a proto zanedbatelné.

### 8.2.1 Chyby a nejistoty při měření tlaku

Pro měření jednotlivých tlaků v měřicí trati jsou instalovány odběry pro převodníky tlaku s lineární charakteristikou AIRFLOW typ PTLN-K. Převodník č.1 měří podtlak vzduchu v odsávacím potrubí a má rozsah 0 až 2,5 kPa. Druhý převodník měří přetlak v přívodu stopového plynu a jeho měřicí rozsah je 0 až 20 kPa. Poslední převodník je instalován pro měření přetlaku vzduchu v příváděcím potrubí 0 až 2,5 kPa. Dle obrázku 6.6. Přesnost u těchto převodníků je výrobcem stanovena pro tlak  $\geq 250 \text{ Pa} \pm 0,5\%$  z měřené veličiny. Úpravou rovnice (8.3) dostáváme obecně pro veličinu  $y$  směrodatnou odchylku ve tvaru:

$$\sigma_y = \frac{\delta \cdot y}{3} \quad (8.8)$$

Pro přetlak vzduchu v příváděcím potrubí  $\Delta p_2 = 9736,5 \text{ Pa}$  je hodnota směrodatné odchylky  $\sigma_{\Delta p_2} = 16,23 \text{ Pa}$ .

Pro podtlak vzduchu v odsávacím potrubí  $\Delta p_1 = 914 \text{ Pa}$  je hodnota směrodatné odchylky  $\sigma_{\Delta p_1} = 1,52 \text{ Pa}$ .

Pro přetlak stopového plynu  $\Delta p_{CO_2} = 1651 \text{ Pa}$  je hodnota směrodatné odchylky  $\sigma_{\Delta p_{CO_2}} = 2,75 \text{ Pa}$ .



Barometrický tlak byl měřen digitálním barometrem DB2 AIRFLOW s rozsahem 0 až 2000 mbar a výrobcem uváděná přesnost je menší než  $\pm 2\%$  z měřené hodnoty pro rozsah 700...+1100 mbar.

Pro barometrický tlak vzduchu  $p = 98300 \text{ Pa}$  je hodnota směrodatné odchylky  $\sigma_p = 655,33 \text{ Pa}$ .

Pro tlak vzduchu v příváděcí větvi platí:  $p_2 = p + \Delta p_2$  (8.9)

Pro tlak vzduchu v odsávací větvi platí:  $p_1 = p + \Delta p_1$  (8.10)

Pro příváděcí tlak stopového plynu platí:  $p_{CO_2} = p + \Delta p_{CO_2}$  (8.11)

Aplikací rovnice (8.7) na vztahy (8.9), (8.10) a (8.11) získáme směrodatné odchylky pro dané absolutní tlaky:

$$\sigma_{p_1} = \sqrt{\left(\frac{\partial p_1}{\partial p} \sigma_p\right)^2 + \left(\frac{\partial p_1}{\partial \Delta p_1} \sigma_{\Delta p_1}\right)^2}, \quad (8.12)$$

$$\sigma_{p_2} = \sqrt{\left(\frac{\partial p_2}{\partial p} \sigma_p\right)^2 + \left(\frac{\partial p_2}{\partial \Delta p_2} \sigma_{\Delta p_2}\right)^2},$$

$$\sigma_{p_{CO_2}} = \sqrt{\left(\frac{\partial p_{CO_2}}{\partial p} \sigma_p\right)^2 + \left(\frac{\partial p_{CO_2}}{\partial \Delta p_{CO_2}} \sigma_{\Delta p_{CO_2}}\right)^2}.$$

Dané směrodatné odchylky jsou dány především směrodatnou odchylkou měření barometrického tlaku. Mají hodnoty vypočítané dle rovnic (8.12):

$\sigma_{p_1} = 655 \text{ Pa}$  - odchylka měření tlaku v odsávacím potrubí

$\sigma_{p_2} = 655 \text{ Pa}$  - odchylka měření tlaku v příváděcím potrubí

$\sigma_{p_{CO_2}} = 655 \text{ Pa}$  - odchylka měření tlaku v příváděcím potrubí  $CO_2$

### 8.2.2 Chyby a nejistoty při měření teploty

Teploty jsou měřené pomocí termočlánků. Teploty měřené jsou: vzduch v odsávací větvi ( $T_1$ ), v přívodním potrubí ( $T_2$ ), teplota stopového plynu ( $T_{CO_2}$ ), vzduch v příváděcí šterbině ( $T_4$ ) a teplota vzduchu v okolí ( $T$ ). Během experimentů je získáno  $n$  hodnot teploty ( $n=162 \div 510$ ). Výběrovou směrodatnou odchylku pro střední hodnotu teploty lze vypočítat dle vztahu (8.6):

$$\bar{\sigma}_T = \sqrt{\frac{\sum_i (T_i - \bar{T})^2}{n(n-1)}} \quad (8.13)$$

Výsledky nejistot pro jednotlivé střední hodnoty měřených teplot jsou uvedeny v tabulce 8.1. Nejistoty jsou určeny při měření účinnosti zesíleného nástavce v horizontální rovině pro hodnotu  $I = 0,6$

Tab.8.1.: Teploty a jejich nejistoty pro měření v horizontální rovině při  $I = 0,6$

$T_1$ [K]	291,25	$\sigma_{T1}$ [K]	0,31
$T_2$ [K]	303,75	$\sigma_{T2}$ [K]	0,18
$T_{CO2}$ [K]	289,95	$\sigma_{TCO2}$ [K]	0,85
$T_4$ [K]	299,05	$\sigma_{T4}$ [K]	0,15
$T$ [K]	290,65	$\sigma_T$ [K]	0,22

### 8.2.3 Chyby a nejistoty při měření průtoku vzduchu a stopového plynu

Před výpočtem nejistoty průtoku odsávaného a přiváděného vzduchu musíme provést korekci změny hustoty kvůli teplotě, protože plovákové průtokoměry jsou cejchovány pro konkrétní teplotu  $t_0$  tekutiny, která protéká průtokoměrem [7]. Vztah pro přepočítání vypadá následovně:

$$\dot{V} = \dot{V}_0 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 \cdot (\rho_p - \rho)}{\rho \cdot (\rho_p - \rho_0)}} \quad (8.14)$$

- $\dot{V}$  skutečný objemový průtok [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
- $\dot{V}_0$  objemový průtok odečtený na stupnici průtokoměru [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
- $\rho_p$  hustota plováku [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $\rho_0$  hustota tekutiny při cejchovní teplotě a tlaku [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $\rho$  hustota kapaliny při měřené teplotě a tlaku [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

Podíl dvou rozdílu v závorkách pod odmocninou je díky velkému řádovému rozdílu hustoty plováku (v našem případě ocel) a hustot tekutin (vzduch, oxid uhličitý) roven téměř jedné  $\frac{(\rho_p - \rho)}{(\rho_p - \rho_0)} \approx 1$ . Proto pro zjednodušení přepočtového vzorce je možné tyto rozdíly zanedbat a přepočtový vztah se nám zjednoduší na:

$$\dot{V} = \dot{V}_0 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} \quad (8.15)$$

Pro výpočet hustoty vzduchu se využije stavová rovnice:

$$\rho = \frac{p}{r \cdot T} \quad (8.16)$$

Dosazením rovnice (8.17) do vztahu (8.16) dostáváme:

$$\dot{V} = \dot{V}_0 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 \cdot r \cdot T}{p}} \Rightarrow \dot{V}_0 = \dot{V} \cdot \sqrt{\frac{p}{\rho_0 \cdot r \cdot T}} \quad (8.17)$$

Při provedených experimentech je k měření objemových průtoků vzduchu odsávaného a přiváděného použit stejný typ průtokoměru. Průtokoměr MFE 80, který je cejchován pro vzduch o teplotě  $t_0 = 0^\circ\text{C}$  a tlaku  $p_0 = 101,3$  kPa. Nejvyšší dovolená nejistota tohoto typu průtokoměru je stanovena výrobcem na  $\varepsilon_V = 2$  m<sup>3</sup>/h.

Dosazením rovnice (8.17) do vztahu (8.7) vypočítáme výběrové směrodatné odchytky průtoku odsávaného a přiváděného vzduchu:

$$\sigma_{\dot{V}_1} = \sqrt{\left( \sqrt{\frac{\rho_0 \cdot r \cdot T_1}{p_1}} \cdot \sigma_{\dot{V}_{01}} \right)^2 + \left( -\frac{1}{2} \cdot \frac{\dot{V}_{01}}{\sqrt{\frac{\rho_0 \cdot r \cdot T_1}{p_1}}} \cdot \frac{\rho_0 \cdot r \cdot T_1}{p_1^2} \cdot \sigma_{p_1} \right)^2 + \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{\dot{V}_{01}}{\sqrt{\frac{\rho_0 \cdot r \cdot T_1}{p_1}}} \cdot \frac{\rho_0 \cdot r}{p_1} \cdot \sigma_{T_1} \right)^2} \quad (8.18)$$

$\dot{V}_{01}$  .....objemový tok odsávaný pro cejchovní hodnoty průtokoměru [ $m^3 \cdot h^{-1}$ ]

$p_1$  .....tlak v odsávací větvi [Pa]

$T_1$  .....teplota odsávaného vzduchu [K]

$r = 287,04 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ... měrná plynová konstanta pro vzduch

$\rho_0 = \frac{p_0}{r \cdot T_0}$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]. ....hustota vzduchu daná cejchovními hodnotami na plovákovém

průtokoměru MFE 80 v odsávací větvi,  $\rho_0 = 1,292 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$\bar{\sigma}_{\dot{V}_{01}}$  .....výběrová směrodatná odchytka daná nejistotou měření plovákovým

průtokoměrem MFE 80, dosazením do rovnice (8.3) dostáváme  $\bar{\sigma}_{\dot{V}_{01}} = 0,67 \text{ [m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$

$\bar{\sigma}_{p_1}$  .....výběrová směrodatná odchytka daná nejistotou tlakoměru,  $\bar{\sigma}_{p_1} = 9,81 \text{ Pa}$

$\bar{\sigma}_{T_1}$  .....výběrová směrodatná odchytka daná nejistotou měření termočlánkem,  $\bar{\sigma}_{T_1} = 0,2 \text{ K}$

Po dosazení hodnot a vypočítání rovnice (8.18) vychází hodnota směrodatné odchytky průtoku odsávaného vzduchu:

$$\sigma_{\dot{V}_1} = 1,01 \text{ m}^3 / \text{h}$$

$$\sigma_{\dot{V}_2} = \sqrt{\left( \sqrt{\frac{\rho_0 \cdot r \cdot T_2}{p_2}} \cdot \sigma_{\dot{V}_{02}} \right)^2 + \left( -\frac{1}{2} \cdot \frac{\dot{V}_{02}}{\sqrt{\frac{\rho_0 \cdot r \cdot T_2}{p_2}}} \cdot \frac{\rho_0 \cdot r \cdot T_2}{p_2^2} \cdot \sigma_{p_2} \right)^2 + \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{\dot{V}_{02}}{\sqrt{\frac{\rho_0 \cdot r \cdot T_2}{p_2}}} \cdot \frac{\rho_0 \cdot r}{p_2} \cdot \sigma_{T_2} \right)^2} \quad (8.19)$$

$\dot{V}_{02}$  .....objemový tok přiváděný pro cejchovní hodnoty průtokoměru [ $m^3 \cdot h^{-1}$ ]

$p_2$  .....tlak v přiváděcí větvi [Pa]

$T_2$  .....teplota přiváděného vzduchu [K]

$r = 287,04 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ... měrná plynová konstanta pro vzduch

$\rho_0 = \frac{p_0}{r \cdot T_0}$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]. ....hustota vzduchu daná cejchovními hodnotami na plovákovém

průtokoměru MFE 80 v přiváděcí větvi,  $\rho_0 = 1,292 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$\bar{\sigma}_{\dot{V}_{O_2}}$  .....výběrová směrodatná odchylka daná nejistotou měření plovákovým průtokoměrem MFE 80, dosazením do rovnice (8.3) dostáváme  $\bar{\sigma}_{\dot{V}_{O_2}} = 0,67 [m^3 \cdot h^{-1}]$

$\bar{\sigma}_{p_2}$  .....výběrová směrodatná odchylka daná nejistotou měření tlakoměru,  $\bar{\sigma}_{p_2} = 9,81$  Pa

$\bar{\sigma}_{T_2}$  .....výběrová směrodatná odchylka daná nejistotou měření termočlánkem,  $\bar{\sigma}_{T_2} = 0,2 K$

Po dosazení hodnot a vypočítání rovnice (8.19) vychází hodnota směrodatné odchylky:

$$\sigma_{\dot{V}_2} = 0,78 m^3 / h$$

Dosazením rovnice (8.18) do vztahu (8.7) vypočteme směrodatné odchylky nastavení požadovaného průtoku CO<sub>2</sub>:

$$\sigma_{\dot{V}_{CO_2}} = \sqrt{\left( \sqrt{\frac{\rho_0 \cdot r_{CO_2} \cdot T_{CO_2}}{P_{CO_2}}} \cdot \sigma_{\dot{V}_{CO_2}} \right)^2 + \left( -\frac{1}{2} \cdot \frac{\dot{V}_{CO_2}}{\sqrt{\frac{\rho_0 \cdot r_{CO_2} \cdot T_{CO_2}}{P_{CO_2}}}} \cdot \frac{\rho_0 \cdot r_{CO_2} \cdot T_{CO_2}}{P_{CO_2}^2} \cdot \sigma_{P_{CO_2}} \right)^2 + \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{\dot{V}_{CO_2}}{\sqrt{\frac{\rho_0 \cdot r_{CO_2} \cdot T_{CO_2}}{P_{CO_2}}}} \cdot \frac{\rho_0 \cdot r_{CO_2}}{P_{CO_2}} \cdot \sigma_{T_{CO_2}} \right)^2} \quad (8.20)$$

$\dot{V}_{CO_2}$  .....objemový tok přiváděného CO<sub>2</sub> pro cejchovní hodnoty průtokoměru  
[m<sup>3</sup> · h<sup>-1</sup>]

$P_{CO_2}$  .....tlak před průtokoměrem v přiváděcí větvi CO<sub>2</sub> [Pa]

$T_{CO_2}$  .....teplota před průtokoměrem v přiváděné směsi CO<sub>2</sub> [K]

$r_{CO_2} = 188,97 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$  ... měrná plynová konstanta pro CO<sub>2</sub>

$\rho_0 = \frac{P_0}{r_{CO_2} \cdot T_0} = 1,204 kg \cdot m^{-3}$  .....hustota CO<sub>2</sub> daná cejchovními hodnotami na plovákovém průtokoměru LD 100 ve větvi přivádějící CO<sub>2</sub>

$\bar{\sigma}_{\dot{V}_{CO_2}} = 1/3 \cdot \varepsilon_p = 0,9734 \cdot 10^{-3} m^3/h$  .....výběrová směrodatná odchylka daná nejistotou měření plovákovým průtokoměrem LD 100, kde  $\varepsilon_p$  je největší dovolená nejistota (stanovena výrobcem  $\varepsilon_p = 2,92 l/h$ )

$\bar{\sigma}_{P_{CO_2}}$  .....výběrová směrodatná odchylka daná nejistotou měření tlakoměru,  $\bar{\sigma}_{P_{CO_2}} = 9,81 Pa$

$\bar{\sigma}_{T_{CO_2}}$  .....výběrová směrodatná odchylka daná nejistotou měření termočlánkem,  $\bar{\sigma}_{T_{CO_2}} = 0,2 K$

Po dosazení hodnot do rovnice (8.20) a vypočtení vyjde hodnota směrodatné odchylky nastavení průtokoměru pro stopový plyn:

$$\sigma_{\dot{V}_{CO_2}} = 1,02 \cdot 10^{-3} m^3 / h$$

## 8.2.4 Nejistota nastavení poměru průtokových hybností I

Poměr průtokových hybností I se vypočítá dle vztahu:

$$I = \frac{\dot{m}_2 \cdot u_2}{\dot{m}_1 \cdot w_1} = \frac{\dot{m}_2^2 \cdot S_1 \cdot \rho_1}{\dot{m}_1^2 \cdot S_2 \cdot \rho_2} = \frac{\dot{m}_1^2 \cdot S_2 \cdot p \cdot r \cdot T_4}{\dot{m}_2^2 \cdot S_1 \cdot p \cdot r \cdot T_1} = \frac{(p_2 \cdot \dot{V}_2)^2 \cdot (r \cdot T_1)^2 \cdot S_1 \cdot T_4}{(p_1 \cdot \dot{V}_1)^2 \cdot (r \cdot T_2)^2 \cdot S_2 \cdot T} = \frac{p_2^2 \cdot \dot{V}_2^2 \cdot T_1^2 \cdot S_1 \cdot T_4}{p_1^2 \cdot \dot{V}_1^2 \cdot T_2^2 \cdot S_2 \cdot T} \quad (8.21)$$

- $\dot{m}_2$  ..... hmotnostní tok přiváděného vzduchu [kg.s<sup>-1</sup>]
- $\dot{m}_1$  ..... hmotnostní tok odsávaného vzduchu [kg.s<sup>-1</sup>]
- $u_2$ ..... počáteční rychlost proudění vzduchu z přiváděcí štěrbině [m.s<sup>-1</sup>]
- $w_1$  .... rychlost odsávaného vzduchu v odsávací štěrbině [m.s<sup>-1</sup>]
- $S_2$ ..... průřez přiváděcí štěrbině [m<sup>2</sup>]
- $S_1$ ..... průřez odsávací štěrbině [m<sup>2</sup>]
- $\rho_2$ ..... hustota vzduchu přiváděného vzduchu [kg.m<sup>3</sup>]
- $\rho_1$ ..... hustota odsávaného vzduchu [kg.m<sup>3</sup>]
- $p$ ..... tlak v okolí [Pa]
- $p_2$ ..... tlak v odsávací větvi [Pa]
- $p_1$ ..... tlak v přiváděcí větvi [Pa]
- $S_1$ ..... plocha odsávací štěrbině [m<sup>2</sup>]
- $S_2$ ..... plocha přiváděcí štěrbině [m<sup>2</sup>]
- $T$ ..... teplota okolí [K]
- $T_1$ ..... teplota v odsávací větvi [K]
- $T_2$ ..... teplota v přivodní větvi [K]
- $T_4$ ..... teplota v přiváděcí štěrbině [K]
- $\dot{V}_2$  ..... objemový tok přiváděného proudu vzduchu [m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>]
- $\dot{V}_1$  ..... objemový tok odsávaného proudu vzduchu [m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>]

Výpočet nejistoty je proveden pro nastavení poměru průtokových hybností  $I=0,6$  (měření v horizontální rovině v ose sacího nástavce). Dosazením rovnice (8.21) do vztahu (8.7) vypočteme směrodatnou odchylku nastavení:

$$\sigma_I = \left[ \left( 2 \cdot \frac{I}{T_4} \cdot \sigma_{T_4} \right)^2 + \left( 2 \cdot \frac{I}{T_2} \cdot \sigma_{T_2} \right)^2 + \left( 2 \cdot \frac{I}{\dot{V}_1} \cdot \sigma_{\dot{V}_1} \right)^2 + \left( 2 \cdot \frac{I}{p_1} \cdot \sigma_{p_1} \right)^2 + \left( -1 \cdot \frac{I}{T} \cdot \sigma_T \right)^2 + \left( -2 \cdot \frac{I}{T_1} \cdot \sigma_{T_1} \right)^2 + \left( -2 \cdot \frac{I}{\dot{V}_2} \cdot \sigma_{\dot{V}_2} \right)^2 + \left( -2 \cdot \frac{I}{p_2} \cdot \sigma_{p_2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8.22)$$

Výpočtem rovnice (8.22) získáme výslednou hodnotou výběrové směrodatné odchylky pro nastavení poměru průtokových hybností  $I$ . Po dosazení je vypočítána směrodatná odchylka  $\sigma_I = 0,080$ . Výsledek stanovení nejistoty je možné zapsat ve tvaru:  $I^* = I \pm \sigma_I$ , tj. pro uvažovaný případ:  $I^* = 0,6 \pm 0,080$

### 8.2.5 Nejistota měření účinnosti odsávání

Účinnost odsávání se stanoví podle vzorce 7.1. Jelikož se při měření hodnoty koncentrací mění, a tím se mění i hodnoty směrodatných odchylek, je zde uveden pro příklad směrodatnou odchylku jednoho měření ve zmíněné horizontální rovině pro poměr

průtokových hybností  $I = 0,6$ . Nejistota pro maximální účinnost v bodě měření v ose sacího nástavce ( $\eta = 93,2\%$ ).

Hodnota koncentrace referenční ( $C_{ref} = 400\text{ppm}$ ) je nastavována podle vztahu

$$C_{ref} = \frac{\dot{V}_{CO_2}}{\dot{V}_1} \quad (8.23)$$

a její nejistota se vypočítá po dosazení do vztahu (8.7):

$$\sigma_{C_{ref}} = \sqrt{\left(\frac{C_{ref}}{\dot{V}_{CO_2}} \cdot \sigma_{\dot{V}_{CO_2}}\right)^2 + \left(-1 \cdot \frac{C_{ref}}{\dot{V}_1} \cdot \sigma_{\dot{V}_1}\right)^2} \quad (8.24)$$

Po dosazení do hodnot do vztahu (8.24) je vypočítaná hodnota výběrové směrodatné odchylky referenční koncentrace  $\sigma_{C_{ref}} = 5,58$  ppm.

Analyzátozem plynů jsou při jednom nastavení a pozici zdroje stopového plynu měřeny tři hodnoty, ze kterých se počítá aritmetický průměr hodnot koncentrace pozadí i odsávaného vzduchu. Směrodatná odchylka střední hodnoty koncentrace  $CO_2$  ve vzduchu pro  $C_{po}$  a  $C_1$  je vypočítána dle vztahu (8.6), kde počet měření  $n = 3$ .

$$\bar{\sigma}_{C_{po}} = \sqrt{\frac{\sum_i (C_{po_i} - \bar{C}_{po})^2}{6}} \quad \text{a} \quad \bar{\sigma}_{C_1} = \sqrt{\frac{\sum_i (C_{1i} - \bar{C}_1)^2}{6}} \quad (8.25)$$

Pro střední koncentraci  $CO_2$  v pozadí  $\bar{C}_{po} = 522$  ppm je směrodatná odchylka střední hodnoty:  $\bar{\sigma}_{C_{po}} = 15,82$  ppm.

Pro střední koncentraci  $CO_2$  v odsávaném vzduchu  $\bar{C}_1 = 894,8$  ppm je směrodatná odchylka střední hodnoty:  $\bar{\sigma}_{C_1} = 17,08$  ppm.

Dosazením vztahu pro výpočet účinnosti (7.1) do vztahu (8.7) získáme rovnici pro výpočet směrodatné odchylky střední hodnoty účinnosti:

$$\bar{\sigma}_{\eta} = \sqrt{\left(\frac{1}{C_{ref} - \bar{C}_{po}} \cdot \bar{\sigma}_{C_1}\right)^2 + \left[ \left( (-1) \cdot \frac{1}{C_{ref} - \bar{C}_{po}} + \frac{\bar{C}_1 - \bar{C}_{po}}{(C_{ref} - \bar{C}_{po})^2} \right) \cdot \bar{\sigma}_{C_{po}} \right]^2 + \left( (-1) \cdot \frac{\bar{C}_1 - \bar{C}_{po}}{(C_{ref} - \bar{C}_{po})^2} \cdot \sigma_{C_{ref}} \right)^2} \quad (8.26)$$

Výsledná hodnota směrodatné odchylky v tomto daném měření pro  $I = 0,6$  a účinnost  $93,2\%$  ze vztahu (8.24)  $\bar{\sigma}_{\eta} = 0,056$ . Výsledek měření je tedy možné zapsat ve tvaru:

$$\eta^* = \bar{\eta} \pm \bar{\sigma}_{\eta}$$

Pro vypočítanou hodnotu je to tedy:  $\eta^* = 93,2 \pm 5,6\%$ .

## 9 Závěr

V předložené práci jsou uvedeny výsledky provedených měření účinností zachycení pro režim tradičního odsávání a 3 režimy odsávání zesíleného ve vertikální rovině. Dále byla provedena měření účinností zachycení v horizontální rovině pro režim tradičního odsávání a zvolený režim odsávání zesíleného. Předložená práce ukazuje evidentní vliv radiálního přívodu vzduchu (režim zesíleného odsávání) v porovnání s tradičním odsáváním a to jak ve vertikální rovině, tak v rovině horizontální.

S přibývajícím množstvím přiváděného radiálního proudu vzduchu se zvětšuje i dosah oblastí vyšších účinností zachycení (90%) až na hodnotu  $x/B=32$ . Oblasti 50% účinnosti zachycení jsou omezená hranou stolu umístěného v  $x/B=53$ . Jako optimální nastavení šterbinového sacího nástavce v kombinaci s pracovním stolem jsem stanovil na  $I=0,6$  při daných provozních podmínkách.

## 10 Seznam použitých zdrojů

- [1] Chyský, J.-Hemzal, K. a kol.: *Větrání a klimatizace. Technický průvodce* sv.31. Bolit. Brno 1993.
- [2] Janotková, E.: *Technika prostředí*. Skripta VUT, Brno 1991.
- [3] Janotková, E.: *Přednášky z Větrání a klimatizace I*. VUT v Brně FSI. Brno 2005.
- [4] Malásek, L.: *Návrh přestavby vzduchotechnického zařízení zesíleného odsávacího systému*. Diplomová práce. Brno 2003.
- [5] Cihelka, J. a kol.: *Vytápění, větrání a klimatizace*. SNTL, Praha 1986.
- [6] Patočka, S.: *Výzkum stavu prostředí při místním odsávání*. Pojednání ke statní doktorské zkoušce. Brno 2000.
- [7] Pavelek, M., Štětina, J.: *Experimentální metody v technice prostředí*, Brno 1997.
- [8] Goodfellow, H.: *Industrial Ventilation Design Guidebook*. Academic Press, San Diego 2001.
- [9] *Nářízení vlády 178/2001 Sb. , které stanovuje podmínky ochrany zdraví zaměstnanců při práci.*
- [10] *Nářízení vlády 524/2002 Sb. , kterým se mění nařízení vlády 178/2001 Sb.*
- [11] Bouzek, V.: *Účinnost odsávání zesíleného štěrbinového sacího nástavce*. Diplomová práce. Brno 2004.
- [12] Hušák, J.: *Výzkum štěrbinového zesíleného odsávacího systému s pracovním stolem*. Diplomová práce. Brno 2006.
- [13] <http://www.ehow.com>



## Seznam nejdůležitějších použitých symbolů

symbol	jednotka	název
$A$	[m]	délka odsávací šterbiny
$a$	[m]	délka přívodní šterbiny
$B$	[m]	šířka odsávací šterbiny
$b$	[m]	šířka přívodní šterbiny
$C_1$	[ppm]	koncentrace stopového plynu v odsávaném vzduchu
$C_2$	[ppm]	koncentrace stopového plynu v pozadí
$C_{rpo}$	[ppm]	hodnota referenční koncentrace stopového plynu bez pozadí v jednotlivých měření
$C_{ref}$	[ppm]	hodnota referenční koncentrace stopového plynu s pozadím
$D$	[m]	průměr odsávacího otvoru nástavce
$I$	[-]	poměr průtokových hybností přiváděného a odsávaného vzduchu
$\dot{m}_1$	[kg.s <sup>-1</sup> ]	hmotnostní tok odsávaného toku
$\dot{m}_2$	[kg.s <sup>-1</sup> ]	hmotnostní tok přiváděného toku
$n$	[-]	počet měření
$p$	[Pa]	tlak okolí
$\Delta p_1$	[Pa]	podtlak v odsávací větvi před průtokoměrem
$\Delta p_2$	[Pa]	přetlak v přívodní větvi před průtokoměrem
$S_1$	[m <sup>2</sup> ]	plocha odsávací šterbiny
$S_2$	[m <sup>2</sup> ]	plocha přiváděcí šterbiny
$t$	[°C]	teplota okolního vzduchu
$t_1$	[°C]	teplota proudu vzduchu před průtokoměrem v odsávací větvi
$t_2$	[°C]	teplota proudu vzduchu před průtokoměrem v přívodní větvi
$t_4$	[°C]	teplota proudu v přívodní šterbině
$t_{CO_2}$	[°C]	teplota CO <sub>2</sub>
$u_2$	[m.s <sup>-1</sup> ]	výtoková rychlost přiváděného radiálního proudu vzduchu
$\dot{V}_1$	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	objemový tok odsávaného proudu vzduchu
$\dot{V}_2$	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	objemový tok přiváděného proudu vzduchu
$\dot{V}_{CO_2}$	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	objemový tok stopového plynu
$w_1$	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost odsávaného vzduchu ve vstupním průřezu
$w_x$	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost v ose sacího nástavce ve vzdálenosti x
$w_{xy}$	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost v místě o souřadnicích x a y

$\bar{w}_{xy}$	[m.s <sup>-1</sup> ]	poměrná rychlost v místě o souřadnicích x a y
$x$	[m]	souřadnice
$y$	[m]	souřadnice
$y^*$	[m]	předpokládaná správná hodnota
$\bar{y}$	[m]	střední hodnota naměřené veličiny
$z$	[m]	souřadnice
$\varepsilon$	[ppm]	odchylka naměřené hodnoty
$\eta$	[%]	účinnost odsávání
$\bar{\sigma}_{C_1}$	[ppm]	výběrová směrodatná odchylka koncentrace stopového plynu v přiváděném vzduchu
$\bar{\sigma}_{C_2}$	[ppm]	výběrová směrodatná odchylka koncentrace stopového plynu v odsávaném vzduchu
$\bar{\sigma}_{C_{ref}}$	[ppm]	výběrová směrodatná odchylka referenční koncentrace stopového plynu
$\bar{\sigma}_n$	[ppm]	výběrová směrodatná odchylka účinnosti odsávání
$\bar{\sigma}_y$		výběrová směrodatná odchylka
$\sigma_a, \sigma_b, \sigma_c$		výběrová směrodatná odchylka veličin a, b, c
$\rho$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	hustota

## Seznam příloh

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot účinnosti odsávání pro  $I = 0,0$  - vertikální rovina

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot účinnosti odsávání pro  $I = 0,3$  - vertikální rovina

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot účinnosti odsávání pro  $I = 0,6$  - vertikální rovina

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot účinnosti odsávání pro  $I = 0,9$  - vertikální rovina

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot účinnosti odsávání pro  $I = 0,0$  - horizontální rovina

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot účinnosti odsávání pro  $I = 0,9$  - horizontální rovina

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot účinnosti odsávání pro  $I = 0$  - vertikální rovina

Zesílený šterbinový odsávací systém s pracovním stolem $I = 0$ - vertikální rovina ( $y = 0$ )								
Odsávaný vzduch	$\dot{V}_1$	207,8	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$		Okolní podmínky			
	$t_1$	21,2	$^{\circ}\text{C}$		$p$	98300	Pa	
	$\Delta p_1$	-886	Pa		$t$	21,5	$^{\circ}\text{C}$	
Přiváděný vzduch	$\dot{V}_2$	-	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$		Přiváděný stopový plyn $\text{CO}_2$			
	$t_2$	-	$^{\circ}\text{C}$		$\dot{V}_{\text{CO}_2}$	71,9	$\text{l} \cdot \text{h}^{-1}$	
	$t_4$	-	$^{\circ}\text{C}$		$t_{\text{CO}_2}$	22,6	$^{\circ}\text{C}$	
	$\Delta p_2$	-	Pa					
číslo měření	pozice bodu bezrozměrné souřadnice		koncentrace stopového plynu			účinnost odsávání	Výběrová směrodatná odchylka	
	$x/B$	$z/B$	$\bar{C}_{po}$		$\bar{C}_1$	$\bar{C}_{ref}$	$\eta$	$\sigma_{\eta}$
	[ - ]	[ - ]	[ ppm ]		[ ppm ]	[ ppm ]	[ % ]	[ % ]
1	0,0	0,0	694,3	1023,9	400	82,4	4,2	
2	4,3	0,0	672,0	1007,2	400	83,8	5,4	
3	13,0	0,0	681,7	1017,3	400	83,9	10,7	
4	21,7	0,0	717,7	1025,3	400	76,9	2,8	
5	30,3	0,0	726,7	1021,5	400	73,7	5,5	
6	39,0	0,0	762,0	1030,0	400	67	4,2	
7	47,7	0,0	737,3	901,7	400	41,1	4,8	
8	47,7	11,8	702,3	866,7	400	41,1	4,5	
9	39,0	11,8	777,7	1030,1	400	63,1	3,1	
10	30,3	11,8	776,3	1055,5	400	69,8	3,8	
11	21,7	11,8	770,7	1066,7	400	74	5,0	
12	13,0	11,8	774,0	1102,4	400	82,1	3,2	
13	4,3	11,8	779,3	1104,5	400	81,3	3,4	
14	0,0	11,8	732,7	1023,1	400	72,6	8,6	
15	0,0	41,5	721,3	970,1	400	62,2	4,6	
16	4,3	41,5	726,7	988,3	400	65,4	5,0	
17	13,0	41,5	721,7	973,3	400	62,9	4,8	
18	21,7	41,5	703,7	932,9	400	57,3	5,4	
19	30,3	41,5	713,0	921,8	400	52,2	5,0	
20	39,0	41,5	723,7	909,7	400	46,5	4,7	
21	47,7	63,7	738,7	893,9	400	38,8	3,2	
22	39,0	63,7	724,7	885,5	400	40,2	3,6	
23	21,7	63,7	751,3	934,1	400	45,7	3,8	
24	13,0	63,7	730,0	922,4	400	48,1	4,2	
25	0,0	63,7	724,5	921,7	400	49,3	2,7	
26	0,0	-3,5	701,3	1026,5	400	81,3	4,8	
27	4,3	-3,5	712,0	1050,0	400	84,5	5,6	
28	13,0	-3,5	725,3	1059,7	400	83,6	4,7	
29	21,7	-3,5	734,9	1038,1	400	75,8	1,4	
30	30,3	-3,5	719,7	1012,5	400	73,2	4,1	
31	39,0	-3,5	750,2	1012,2	400	65,5	4,5	
32	47,7	-3,5	730,0	886,8	400	39,2	1,6	

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot účinnosti odsávání pro  $I = 0,3$  - vertikální rovina

Zesílený šterbinový odsávací systém s pracovním stolem $I = 0,3$ - vertikální rovina ( $y = 0$ )							
Odsávaný vzduch	$\dot{V}_1$	207,8	$m^3 \cdot h^{-1}$		Okolní podmínky		
	$t_1$	29,2	$^{\circ}C$		$p$	98700	Pa
	$\Delta p_1$	-954	Pa		$t$	17,2	$^{\circ}C$
Přiváděný vzduch	$\dot{V}_2$	86,3	$m^3 \cdot h^{-1}$		Přiváděný stopový plyn $CO_2$		
	$t_2$	29,2	$^{\circ}C$		$\dot{V}_{CO_2}$	71,9	$l \cdot h^{-1}$
	$t_4$	24,3	$^{\circ}C$		$t_{CO_2}$	24,3	$^{\circ}C$
	$\Delta p_2$	9664,2	Pa				
číslo měření	pozice bodu bezrozměrné souřadnice		koncentrace stopového plynu			účinnost odsávání	Výběrová směrodatná odchylka
	$x/B$	$z/B$	$\bar{C}_{po}$	$\bar{C}_1$	$\bar{C}_{ref}$	$\eta$	$\sigma_{\eta}$
	[ - ]	[ - ]	[ ppm ]	[ ppm ]	[ ppm ]	[ % ]	[ % ]
1	0,0	0,0	601,0	971,8	400	92,7	5,5
2	4,3	0,0	615,7	984,5	400	92,2	6,1
3	13,0	0,0	635,0	1003,4	400	92,1	10,8
4	21,7	0,0	641,0	978,6	400	84,4	3,5
5	30,3	0,0	647,7	962,9	400	78,8	7,1
6	39,0	0,0	664,0	921,2	400	64,3	16,5
7	47,7	0,0	662,0	869,6	400	51,9	9,4
8	56,3	0,0	668,7	729,1	400	15,1	5,4
9	64,0	11,8	711,3	765,7	400	13,6	2,4
10	56,0	11,8	694,3	875,5	400	45,3	4,0
11	47,7	11,8	714,3	955,9	400	60,4	4,6
12	39,0	11,8	722,3	998,7	400	69,1	6,2
13	30,3	11,8	736,0	1045,2	400	77,3	6,9
14	21,7	11,8	736,0	1055,2	400	79,8	4,7
15	13,0	11,8	749,7	1055,7	400	76,5	3,6
16	4,3	11,8	754,7	1103,5	400	87,2	5,0
17	4,3	41,5	787,0	818,6	400	7,9	4,9
18	13,0	41,5	821,7	857,3	400	8,9	4,4
19	21,7	41,5	844,0	856,8	400	3,2	3,5
20	30,3	41,5	840,7	851,9	400	2,8	4,4
21	39,0	41,5	831,3	840,5	400	2,3	4,1
22	47,7	63,7	834,0	878,4	400	11,1	2,3
23	0,0	-3,5	826,7	1193,9	400	91,8	5,2
24	4,3	-3,5	829,6	1194,8	400	91,3	3,0
25	13,0	-3,5	822,5	1188,5	400	91,5	5,1
26	21,7	-3,5	845,2	1170,4	400	81,3	5,7
27	30,3	-3,5	841,7	1148,9	400	76,8	4,0
28	39,0	-3,5	830,4	1080,4	400	62,5	12,9
29	47,7	-3,5	841,0	1037,8	400	49,2	4,9
30	56,3	-3,5	852,5	897,3	400	11,2	2,9

**Tabulka naměřených a vypočtených hodnot účinnosti odsávání pro  $I = 0,6$  - vertikální rovina**

Zesílený štěrbinový odsávací systém s pracovním stolem $I = 0,6$ - vertikální rovina ( $y = 0$ )							
Odsávaný vzduch	$\dot{V}_1$	207,8	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	Okolní podmínky			
	$t_1$	29,2	$^{\circ}\text{C}$	$P$	98300	Pa	
	$\Delta p_1$	-847	Pa	$t$	17,5	$^{\circ}\text{C}$	
Přiváděný vzduch	$\dot{V}_2$	121,6	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	Přiváděný stopový plyn $\text{CO}_2$			
	$t_2$	30,6	$^{\circ}\text{C}$	$\dot{V}_{\text{CO}_2}$	71,9	$\text{l} \cdot \text{h}^{-1}$	
	$t_4$	25,9	$^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{CO}_2}$	25,9	$^{\circ}\text{C}$	
	$\Delta p_2$	9650	Pa				
číslo měření	police bodu bezrozměrné souřadnice		koncentrace stopového plynu			účinnost odsávání	výběrová směrodatná odchylka
	$x/B$	$z/B$	$\bar{C}_{po}$	$\bar{C}_1$	$\bar{C}_{ref}$	$\eta$	$\sigma_{\eta}$
	[ - ]	[ - ]	[ ppm ]	[ ppm ]	[ ppm ]	[ % ]	[ % ]
1	0,0	0,0	522,0	894,8	400	93,2	5,6
2	4,3	0,0	556,0	925,2	400	92,3	10,2
3	13,0	0,0	577,7	954,1	400	94,1	13,3
4	21,7	0,0	594,7	961,1	400	91,6	7,3
5	30,3	0,0	586,7	952,7	400	91,5	6,9
6	39,0	0,0	626,3	943,5	400	79,3	3,1
7	47,7	0,0	630,3	927,1	400	74,2	3,5
8	56,3	0,0	702,7	745,1	400	10,6	8,3
9	56,3	11,8	734,7	827,9	400	23,3	6,3
10	47,7	11,8	771,0	983,8	400	53,2	4,6
11	39,0	11,8	770,0	1084,4	400	78,6	10,1
12	30,3	11,8	768,0	1106,0	400	84,5	8,7
13	21,7	11,8	787,3	1068,1	400	70,2	7,5
14	13,0	11,8	846,0	912,0	400	16,5	4,7
15	13,0	21,8	858,7	858,7	400	0	4,5
16	21,7	21,8	858,3	868,3	400	2,5	2,4
17	30,3	21,8	866,3	898,3	400	8	4,5
18	0,0	-3,5	839,8	1221,0	400	95,3	15,7
19	4,3	-3,5	858,7	1255,1	400	99,1	4,4
20	13,0	-3,5	858,3	1248,7	400	97,6	4,5
21	21,7	-3,5	874,2	1254,6	400	95,1	2,7
22	30,3	-3,5	845,1	1211,1	400	91,5	4,6
23	39,0	-3,5	852,6	1169,8	400	79,3	3,4
24	47,7	-3,5	861,4	1158,2	400	74,2	5,2
25	56,3	-3,5	867,2	909,6	400	10,6	4,7

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot účinnosti odsávání pro  $I = 0,9$  - vertikální rovina

Zesílený štěrbinový odsávací systém s pracovním stolem $I = 0,9$ - vertikální rovina ( $y = 0$ )							
Odsávaný vzduch	$\dot{V}_1$	207,8	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	Okolní podmínky			
	$t_1$	29,2	$^{\circ}\text{C}$	$P$	96900	Pa	
	$\Delta p_1$	-847	Pa	$t$	17,5	$^{\circ}\text{C}$	
Přiváděný vzduch	$\dot{V}_2$	148,9	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	Přiváděný stopový plyn $\text{CO}_2$			
	$t_2$	31,2	$^{\circ}\text{C}$	$\dot{V}_{\text{CO}_2}$	71,9	$\text{l} \cdot \text{h}^{-1}$	
	$t_4$	17	$^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{CO}_2}$	26,5	$^{\circ}\text{C}$	
	$\Delta p_2$	9523,6	Pa				
číslo měření	police bodu bezrozměrné souřadnice		koncentrace stopového plynu			účinnost odsávání	výběrová směrodatná odchylka
	$x/B$	$z/B$	$\bar{C}_{po}$	$\bar{C}_1$	$\bar{C}_{ref}$	$\eta$	$\sigma_{\eta}$
	[ - ]	[ - ]	[ ppm ]	[ ppm ]	[ ppm ]	[ % ]	[ % ]
1	0,0	0,0	573,3	910,5	400	84,3	6,1
2	4,3	0,0	574,0	910,8	400	84,2	7,8
3	13,0	0,0	623,3	958,9	400	83,9	5,9
4	21,7	0,0	640,7	976,3	400	83,9	8,3
5	30,3	0,0	668,7	1001,5	400	83,2	9,2
6	39,0	0,0	669,7	998,9	400	82,3	6,3
7	47,7	0,0	730,3	866,7	400	34,1	6,1
8	47,7	11,8	767,7	909,3	400	35,4	5,4
9	39,0	11,8	781,7	975,7	400	48,5	3,4
10	30,3	11,8	841,3	1107,7	400	66,6	2,6
11	21,7	11,8	837,3	1098,1	400	65,2	2,7
12	13,0	11,8	880,3	997,5	400	29,3	5,5
13	13,0	21,8	868,7	877,5	400	2,2	2,3
14	21,7	21,8	855,0	871,0	400	4	3,1
15	30,3	21,8	877,7	956,9	400	19,8	5,6
16	39,0	21,8	872,0	973,6	400	25,4	11,7
17	47,7	21,8	899,7	996,9	400	24,3	1,7
18	0,0	-3,5	881,4	1206,2	400	81,2	4,2
19	4,3	-3,5	872,6	1193,4	400	80,2	7,8
20	13,0	-3,5	859,0	1183,4	400	81,1	6,0
21	21,7	-3,5	873,5	1197,1	400	80,9	6,7
22	30,3	-3,5	871,0	1191,8	400	80,2	7,6
23	39,0	-3,5	897,3	1218,5	400	80,3	4,7
24	47,7	-3,5	882,1	1018,5	400	34,1	9,3

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot účinnosti odsávání pro  $I = 0$  - horizontální rovina

Zesílený štěrbinový odsávací systém s pracovním stolem $I = 0,0$ - horizontální rovina ( $z = 0$ )							
Odsávaný vzduch	$\dot{V}_1$	207,8	$m^3 \cdot h^{-1}$	Okolní podmínky			
	$t_1$	16,6	$^{\circ}C$	$P$	98300	Pa	
	$\Delta p_1$	-886	Pa	$t$	16,1	$^{\circ}C$	
Přiváděný vzduch	$\dot{V}_2$	122	$m^3 \cdot h^{-1}$	Přiváděný stopový plyn $CO_2$			
	$t_2$	16,6	$^{\circ}C$	$\dot{V}_{CO_2}$	71,9	$l \cdot h^{-1}$	
	$t_4$	16,6	$^{\circ}C$	$t_{CO_2}$	16,6	$^{\circ}C$	
	$\Delta p_2$	9736,5	Pa				
číslo měření	pozice bodu bezrozměrné souřadnice		koncentrace stopového plynu			účinnost odsávání	výběrová směrodatná odchylka
	$x/B$	$y/B$	$\bar{C}_{po}$	$\bar{C}_1$	$\bar{C}_{ref}$	$\eta$	$\sigma_{\eta}$
	[ - ]	[ - ]	[ ppm ]	[ ppm ]	[ ppm ]	[ % ]	[ % ]
1	0,0	-4,0	702,0	1036,0	400	83,5	4,3
2	0,0	-8,0	712,7	1045,5	400	83,2	7,4
3	0,0	-12,0	727,0	1058,6	400	82,9	6,1
4	0,0	-16,0	753,0	1087,0	400	83,5	7,4
5	0,0	-20,0	770,0	1084,4	400	78,6	7,4
6	0,0	-24,0	783,0	1078,2	400	73,8	3,7
7	0,0	-28,0	780,0	1056,8	400	69,2	3,2
8	0,0	-32,0	775,7	1049,3	400	68,4	4,0
9	0,0	-36,0	778,7	1041,9	400	65,8	4,2
10	0,0	-44,0	788,0	963,6	400	43,9	5,7
11	0,0	8,0	798,7	1125,5	400	81,7	3,2
12	4,3	-4,0	779,7	1103,3	400	80,9	3,2
13	4,3	-20,0	778,0	1070,8	400	73,2	3,1
14	4,3	-36,0	811,3	1047,7	400	59,1	3,6
15	4,3	-44,0	813,7	1009,3	400	48,9	5,7
16	4,3	-48,0	825,7	1008,1	400	45,6	9,2
17	30,3	-4,0	829,0	1110,2	400	70,3	5,4
18	30,3	-20,0	826,0	1083,2	400	64,3	6,4
19	30,3	-36,0	833,0	997,4	400	41,1	6,3
20	47,7	-4,0	807,7	934,9	400	31,8	10,5
21	0,0	4,0	800,3	1135,5	400	83,8	7,2
22	0,0	20,0	810,3	1089,5	400	69,8	4,8
23	0,0	36,0	831,0	1076,2	400	61,3	5,5
24	4,3	4,0	837,7	1150,5	400	78,2	4,7
25	4,3	20,0	836,0	1133,2	400	74,3	5,0
26	4,3	36,0	854,0	1128,8	400	68,7	4,4
27	30,3	4,0	847,0	1117,0	400	67,5	5,4
28	30,3	20,0	853,3	1092,5	400	59,8	4,7
29	30,3	36,0	854,0	1003,6	400	37,4	5,2
30	47,7	4,0	867,3	1048,1	400	45,2	4,5
31	47,7	20,0	859,7	1021,7	400	40,5	4,0
32	0,0	0,0	851,2	1186,4	400	83,8	2,9
33	0,0	44,0	863,7	1029,7	400	41,5	3,3



**Tabulka naměřených a vypočtených hodnot účinnosti odsávání pro  $I = 0,6$  - horizontální rovina**

Zesílený štěrbinový odsávací systém s pracovním stolem $I = 0,6$ - vertikální rovina ( $z = 0$ )							
Odsávaný vzduch	$\dot{V}_1$	207,8	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	Okolní podmínky			
	$t_1$	16,6	$^{\circ}\text{C}$	$p$	98300	Pa	
	$\Delta p_1$	-914	Pa	$t$	16,1	$^{\circ}\text{C}$	
Přiváděný vzduch	$\dot{V}_2$	122	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	Přiváděný stopový plyn $\text{CO}_2$			
	$t_2$	16,6	$^{\circ}\text{C}$	$\dot{V}_{\text{CO}_2}$	71,9	$\text{l} \cdot \text{h}^{-1}$	
	$t_4$	16,6	$^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{CO}_2}$	16,6	$^{\circ}\text{C}$	
	$\Delta p_2$	9736,5	Pa				
číslo měření	police bodu bezrozměrné souřadnice		koncentrace stopového plynu			účinnost odsávání $\eta$	výběrová směrodatná odchylka $\sigma_{\eta}$
	$x/B$	$y/B$	$\bar{C}_{po}$	$\bar{C}_1$	$\bar{C}_{ref}$		
	[ - ]	[ - ]	[ ppm ]	[ ppm ]	[ ppm ]	[ % ]	[ % ]
1	0,0	4,0	630,0	1003,6	400	93,4	2,1
2	0,0	20,0	691,0	1025,4	400	83,6	4,4
3	0,0	36,0	648,7	937,5	400	72,2	2,7
4	0,0	44,0	714,0	954,4	400	60,1	3,4
5	4,3	44,0	750,3	989,5	400	59,8	2,0
6	4,3	48,0	794,0	1015,2	400	55,3	12,7
7	4,3	56,0	795,3	858,5	400	15,8	4,2
8	4,3	36,0	840,0	1100,8	400	65,2	5,8
9	4,3	20,0	807,0	1127,8	400	80,2	6,1
10	4,3	4,0	837,0	1202,2	400	91,3	2,1
11	30,3	4,0	818,3	1159,9	400	85,4	2,8
12	30,3	20,0	865,0	1133,4	400	67,1	2,6
13	30,3	36,0	846,0	1080,4	400	58,6	7,1
14	30,3	44,0	909,7	1072,9	400	40,8	1,8
15	30,3	56,0	917,0	1039,0	400	30,5	2,8
16	30,3	60,0	903,0	1047,0	400	36	1,8
17	47,7	60,0	885,3	953,7	400	17,1	4,4
18	47,7	56,0	910,3	1012,7	400	25,6	2,6
19	47,7	44,0	901,3	1070,5	400	42,3	2,3
20	47,7	36,0	892,0	1028,8	400	34,2	1,9
21	47,7	20,0	914,3	1061,1	400	36,7	2,1
22	47,7	-20,0	911,7	1044,5	400	33,2	1,7
23	47,7	-36,0	917,3	1007,3	400	22,5	6,4
24	30,3	-36,0	926,7	1132,3	400	51,4	4,5
25	30,3	-48,0	931,0	1083,4	400	38,1	2,3
26	30,3	-20,0	910,7	1136,7	400	56,5	1,3
27	4,3	-20,0	904,3	1205,5	400	75,3	5,4
28	4,3	-36,0	899,0	1148,6	400	62,4	1,9
29	4,3	-48,0	897,7	1133,3	400	58,9	1,8
30	4,3	-56,0	896,3	1012,3	400	29	3,8
31	0,0	-56,0	886,3	1077,9	400	47,9	5,8
32	0,0	-36,0	880,7	1142,3	400	65,4	2,5
33	0,0	-20,0	878,0	1195,2	400	79,3	0,7

34	0,0	0,0	881,1	1253,8	400	93,2	3,0
35	4,3	0,0	873,4	1242,2	400	92,3	2,0
36	13,0	0,0	894,3	1270,4	400	94,1	1,2
37	21,7	0,0	896,8	1262,4	400	91,6	5,6
38	30,3	0,0	882,4	1248,0	400	91,5	3,6
39	39,0	0,0	873,7	1190,2	400	79,3	4,4
40	47,7	0,0	879,5	1175,8	400	74,2	9,3
41	56,3	0,0	884,3	926,4	400	10,6	3,4