

Analýza odsávacího systému technologických zplodin v elektronické výrobě

The extraction system

Bc. Petr Žajdlík

Diplomová práce
2008

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav automatizace a řídicí techniky
akademický rok: 2007/2008

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Petr ŽAJDLÍK
Studijní program: N 3902 Inženýrská informatika
Studijní obor: Automatické řízení a informatika

Téma práce: Analýza odsávacího systému technologických zplodin v elektronické výrobě.

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte problematiku odsávání technologických zplodin v elektronické výrobě.
2. Seznamte se s principy používaných odsávacích systémů, jejich parametry a konstrukcí.
3. Prostudujte fyzikální principy proudění v rozvodech odsávacích systémů se zaměřením na průběh tlaku, rychlosti proudění a objemového průtoku.
4. Zpracujte přehledně využívané fyzikální principy, technologické a materiálové aspekty odsávacích systémů.
5. Navrhněte měřicí metodu pro analýzu reálného odsávacího systému z hlediska jeho účinnosti při instalaci a v průběhu praktického provozu.
6. Proveďte praktické měření odsávacího systému v elektronické výrobě a analyzujte výsledky v závislosti na konfiguraci systému, zátěži a znečištění.
7. Navrženou a ověřenou metodu zpracujte formou instrukční příručky.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. David V. Chadderton: A practical introduction: Air Conditioning, December 1997 ISBN10:0-203-47736-7
2. Aplikační manuál anemometru CFM 407119A: firmy Extech instruments
3. R.H.Macmillan: Manuál: Measurement of Air flow, October 2003[www.purexLtd.co.uk]
4. G.J.Matthews: Příručka: How to measure flow and pressure, dostupný z WWW
5. P.J.Moriarty, A.C.Hansen: AeroDyn Theory Manual, January 2005 [www.osti.gov/bridge]
6. Měření průtoku a výšky hladiny: Technické informace firmy Omega, [www.omegaeng.cz]
7. M.Adámek,S.Vavruša: Hmotnostní měření malých průtoků tekutin v uzavřených kanálech
8. Mabramowski: Brožura: Odsávací a filtrační zařízení pro kouř a prach:[www.tekanet.de]
9. Compressible air flow calculation - theory: Výpočty: [www.pipeflowcalculations.com/airflow/theory.html]
10. Jackson Hall: Air Flow in pipes: [http://me.queensu.ca/courses/MECH398/]
11. Kemper: Odsávací systémy: [www.kemper.cz]

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Neumann, Ph.D.

Ústav elektrotechniky a měření

Datum zadání diplomové práce:

22. února 2008

Termín odevzdání diplomové práce:

6. června 2008

Ve Zlíně dne 22. února 2008


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan




prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá analýzou odsávacích systémů technologických zplodin v elektronické výrobě. Řeší otázku důvodů použití a možné řešení odsávání škodlivin, proudění plynů v potrubí, nejběžněji používané konstrukční prvky jejich vliv na proudění a negativa jako hluk jednotek. Obsahově vychází z knih Air Conditioning od autora Davida V. Chaddertona, Větrání a klimatizace od autor J. Chynský, K. Hemzal. Součástí práce je návrh vlastní metody měření pomocí anemometru, kterou jsem aplikoval na praktické měření ve firmě ELKO.

Klíčová slova: odsávací systémy, zplodiny, elektronická výroba, proudění plynů, konstrukční prvky, hluk, větrání, klimatizace, anemometr.

ABSTRACT

My thesis deals with the analysis of fumes extraction system in electronic production. It touches the grounds and possible solutions for pollutants extraction, gas flow in pipelines, common construction elements and their influence on extracted media flow, and also drawbacks like the noise of extracting units. This thesis draws from literature on air conditioning, namely Air Conditioning by Davida V. Chadderton, and Ventilation and Air Condition by Chynsky and Hemzal. The substantial part of my thesis is the anemometer measurement method and measurement results from the field measurement on the real extraction system realized in the facility of ELKO company.

Keywords: exhaust systems, pollutants, electronic production, gas flow, construction elements, noise, ventilation, air - conditioning, anemometer

Děkuji Ing. Petrovi **Neumannovi** Ph.D. za vedení mé diplomové práce, za jeho věcné připomínky v průběhu řešení práce, poskytnuté materiály a ochotu při řešení problémů.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....

Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD.....	8
I. TEORETICKÁ ČÁST	9
1 ODSÁVÁNÍ ZPLODIN V ELEKTRONICKÉ VÝROBĚ	10
1.1 Důvody použití.....	10
1.1.1 zdraví člověka.....	10
1.1.2 Materiální škody.....	13
1.2 Větrání.....	13
1.2.1 Nucené (mechanické) větrání.....	13
1.2.2 Přirozené větrání.....	14
1.3 Příklady řešení podle použité technologie.....	14
1.3.1 Ruční pájení.....	15
1.3.2 Svařování.....	18
1.3.3 Termické řezání kovů.....	21
1.3.4 Technologický princip čištění vzduchu.....	24
2 TEORIE SPOJENÁ S ODSÁVÁNÍM ŠKODLIVIN.....	26
2.1 Ventilátory.....	26
2.1.1 Rozdělení ventilátorů	26
2.1.2 Hlavní části ventilátorů	27
2.1.3 Charakteristiky ventilátorů	28
2.1.4 Ventilátory používané v praxi	30
2.2 Rozvody odsávání	32
2.2.1 Konstrukce vzduchovodů	32
3 PROUDĚNÍ PLYNŮ	36
3.1 Základy pohybu vzduchu.....	36
3.2 Proudění vzduchu v potrubí	37
3.3 Základní vztahy pro výpočet tlakových ztrát	39
4 VLIV KONSTRUKČNÍCH PRVKŮ NA PROUDĚNÍ.....	43
4.1 Změna směru	43
4.1.1 Oblouk kruhového nebo čtvercového průřezu	43
4.1.2 Koleno ostré kruhového nebo čtvercového průřezu.....	45
4.1.3 Výpočet tlakových ztrát tvarovek- změna směru	47
4.2 Změna průřezu	48
4.2.1 Difuzor - rozšíření průřezu	49
4.2.2 Konfuzor – zúžení průřezu	50
4.2.3 Výpočty tlakových ztrát přechodů	51
4.3 Dělení a spojování proudů	52
5 HLUČNOST ODSÁVACÍCH JEDNOTEK.....	53
5.1 Základní veličiny technické akustiky	53
5.2 Zdroje hluku	53
5.3 Ventilátor jako zdroj hluku.....	54
5.4 Aerodynamický hluk v přímém potrubí	57
5.5 Hluk pravoúhlého oblouku.....	57
6 METODY MĚŘENÍ PARAMETRŮ ODSÁVACÍHO SYSTÉMU	59
6.1 Principy měření	59
6.1.1 Venturiho trubice.....	59
6.1.2 Pitotova a Prandtlůva trubice	60
6.2 Používané typy anemometrů	63

II. PRAKTICKÁ ČÁST	65
7 NÁVRH METODY MĚŘENÍ	66
8 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ.....	68
8.1 Cíl měření.....	68
8.2 Vlastnosti měřícího přístroje.....	68
8.3 Vlastnosti odsávací jednotky	68
8.4 Popis systému	69
8.5 Průběh měření	72
8.6 Vyhodnocení měření.....	76
ZÁVĚR.....	79
ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ	80
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	81
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	82
SEZNAM OBRÁZKŮ	84
SEZNAM TABULEK	85
SEZNAM PŘÍLOH.....	86

ÚVOD

V době velkého růstu technologických procesů vzniká velké množství škodlivin, které mohou negativně působit na okolí. Tento fakt vede k vhodnému řešení jak odstraňovat škodliviny zejména z oblastí kde pracují lidé. Zdraví člověka se stává prvořadou záležitostí. Na trhu existuje řada filtračních jednotek, které odstraňují nebezpečné škodliviny. Za negativní jev pak považujeme hluk filtračních jednotek způsobený ventilátorem. Filtrační jednotky se liší konstrukcí a použitím materiálů, kde záleží u jakého technologického procesu ji budeme využívat. Základní princip filtru však zůstává, dochází k redukci znečištěné látky na přijatelnou mez. Zejména s postupujícím vývojem v elektrotechnickém a elektronickém průmyslu se zvyšuje i význam pájení. Při pájení vznikají dýmy, plyny a aerosolové částice, které mohou ohrozit zdraví obsluhujícího pracovníka, pokud proniknou do jeho dýchacích cest. Proto je při veškerých pracích spojených s tímto technologickým postupem nezbytné realizovat odpovídající odsávání. Odsávací systémy je nutné kontrolovat, především potrubí, které se vlivem znečištěného proudu znečištěného vzduchu zanáší.

Pro praktické měření průtoku vzduchu v potrubí je potřeba zvolit případně navrhnout vhodnou metodu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ODSÁVÁNÍ ZPLODIN V ELEKTRONICKÉ VÝROBĚ

V dnešní době vyžadují mnohá moderní pracoviště větrání a to z důvodu legislativy předepisující ochranu zaměstnanců. Každá země vyžaduje jiné nároky, které stanovuje právní úprava. Větrání musí zabezpečit zdravé pracovní prostředí a duševní pohodu zaměstnancům. Lokální větrání je často používané z technických důvodů. Pomáhá odstraňovat například kouř, prach a výpary vzniklé při daném procesu. Dále dochází k redukci špatné docházky a zlepšují se vztahy mezi zaměstnancem a zaměstnavatelem. Zlepšuje se pracovní prostředí.

1.1 Důvody použití

Svařování pájení a dělení materiálů patří mezi činnosti, u kterých existuje zvýšené riziko ohrožení zdraví. Stále však existují pracoviště a pracovníci, kteří tato nebezpečí podceňují. Taková nezodpovědná činnost může mít velký vliv na zdraví člověka a přinést mu trvalé zdravotní následky, případně způsobit materiální škody na zařízení.

1.1.1 zdraví člověka

Zdraví člověka je nejdůležitějším aspektem. Existuje velké množství nejrůznějších zplodin, prachu a kouře, které může vážně poškodit zdraví. Člověk vystavený nepřetržitě i malému množství prachu v prašném prostředí může mít potíže s dýcháním, astmatické problémy a jiné. Takový jedinec již nemůže vykonávat tuhle práci.

- Ultrafialové a infračervené záření

Ultrafialové a infračervené záření se vyskytuje ve všech typech obloukového svařování a plazmového řezání. Viditelné světlo poškozuje sítnici, ultrafialové vyzařování způsobuje tzv. "nablýskání v očích" a úžeh, ultrafialové vyzařování o krátkých vlnách dráždí rohovku a během 10 - 30 let může způsobit šedý zákal. Ultrafialové vyzařování o dlouhých vlnách mění tepelnou rovnováhu lidského těla a infračervené záření způsobí přehřátí organismu.

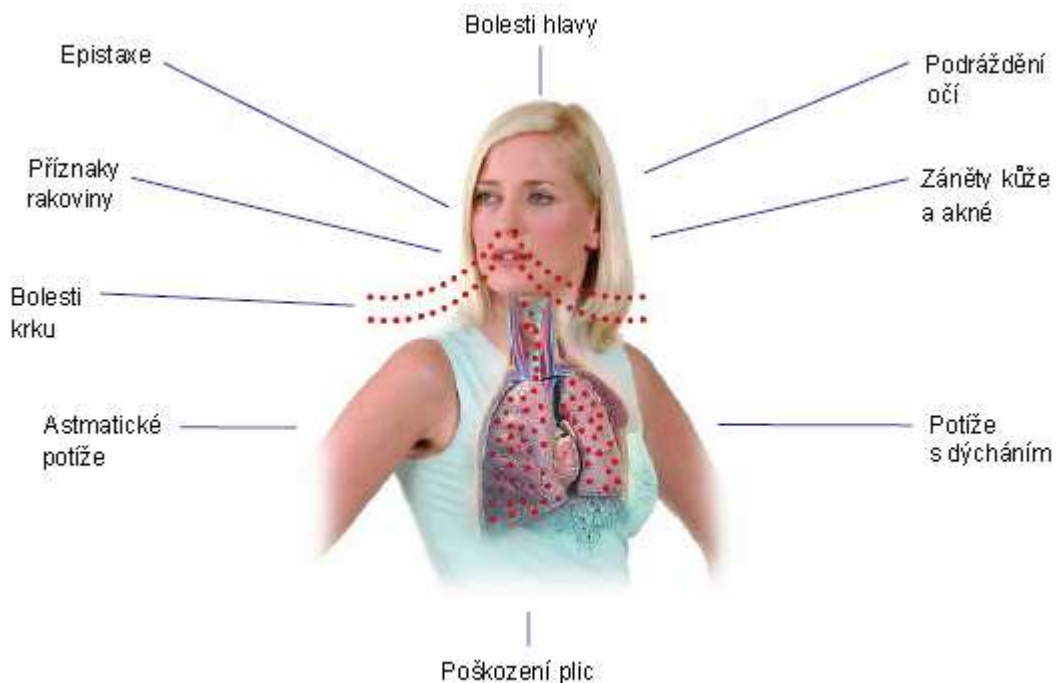
- Popáleniny

Popáleniny nejčastěji způsobují rozstříky rozžhaveného kovu z tavné nebo řezné lázně.

- Dýmy, zplodiny a aerosoly

Při technologických procesech jako je svařování, pájení nebo řezání vzniká dým. K dýmu se přidávají různé nečistoty z vrstev na materiálu například barva, čisticí prostředky, oleje, plyny. Vznikající dýmy, aerosoly plyny mají rozdílné chemické složení, vždy jsou zdraví škodlivé.

Dýmy, zplodiny a aerosoly způsobují podráždění očí, kůže a dýchacího systému, i daleko vážnější zdravotní komplikace a to buď okamžitě, ale také po mnoha letech.



Obr. 1 Možné zdravotní následky způsobené prachem a kouřem

- Škodlivé látky ovlivňující zdraví člověka

Berylium - berylium a jeho složky jsou vysoce toxické. Tato látka způsobuje nevratné změny na plicích.

Kadmium - kadmiové zplodiny nebo malé částičky mohou po vdechnutí způsobit vážné poškození zdraví nebo smrt. Oxidové zplodiny u kadmia často způsobují výskyt syndromů, které přetrvávají až několik hodin. Kadmium je karcinogen.

Oxid uhelnatý - Pokud je oxid uhelnatý používán jako ochranná atmosféra, může dojít k jeho nahromadění do nebezpečné koncentrace. Je toxický, bezbarvý a bez zápachu.

Vystavení nízkým koncentracím může způsobit bolest hlavy, otupělost a celkovou únavu. Toxické účinky jsou obdobné nedostatku kyslíku. Vystavení vysoké koncentraci oxidu uhelnatého způsobuje ztrátu vědomí.

Chrom - náhlé vystavení chromovému prachu nebo zplodinám způsobuje kašel a kýčání, bolest hlavy, potíže s dýcháním, bolest při hlubokém nádechu a horečku. Další symptomy zahrnují podráždění spojivky, bolest horních cest dýchacích, hnisání a perforaci nosní přepážky, chronickou bronchitidu a změnu barvy kůže. Některé formy chrómu způsobují rakovinu dýchacích cest.

Měď - zplodiny a měděný prach způsobují podráždění horních cest dýchacích, kovovou pachut' v ústech, nechutenství, mentální zamlženost, v některých případech také změnu barvy kůže a vlasů. Měděný prach dráždí kůži, způsobuje bolest, zrudnutí a zánět. Může také způsobit zánět spojivek a zanícení rohovky.

Fluoridy - fluoridové zplodiny značně dráždí oči, nos a krk. Chronické vstřebávání fluoridu může způsobit sklerózu, řídnutí kostí a žilkování zubů.

Oxid železitý - vdechnutí těchto zplodin nebo prachu může způsobit chřipková onemocnění trvající 24 až 48 hodin a také benigní zaprášení plic (sideróza).

Olovo - olověné zplodiny nebo jemný prach mohou při vdechnutí způsobit otravu olovem, anémii, svalovou slabost, nechutenství, zvracení, koliku nebo smrt.

Mangan - manganový prach a zplodiny dráždí oči a sliznice dýchacího ústrojí. Brzké rozpoznání chronické otravy manganem je velmi obtížné. Projevy postupující nemoci se liší u jednotlivých případů. Znaky a symptomy mohou zahrnovat apatii, podrážděnost, ztrátu chuti k jídlu, bolest hlavy, slabost svalů na nohou a bolest kloubů. Běžné jsou také poruchy řeči. Chronická otrava manganem člověka činí nezpůsobilým (invalidním), není však zpravidla smrtelná.

Ozon - Ozon má zřetelnou vůni. Nadměrné vystavení působení ozonu se může projevit podrážděním očí, nosu a krku. Příliš velké vystavení může způsobit i smrt.

Fosgen - Vdechnutí velké koncentrace fosgenu může způsobit plicní otok, který se zpravidla dostavuje po několika hodinách, kdy se žádné symptomy neprojevují. Fosgen nemá téměř žádné okamžité dráždivé účinky, takže nijak nevaruje na jeho vdechnutí i nebezpečné koncentrace.

Oxid křemičitý - krystalické formy oxidu křemičitého způsobují silikózu.

Zinek - Zinek může způsobit horečku, které se často říká "zinkový zápal". Symptomy se zpravidla projeví několik hodin po vystavení a zahrnují kovovou pachut' v ústech, pocit

sucha v nose a v krku, slabost, únavu, bolesti ve svalech a kloubech, horečku, třes a nechutenství.

1.1.2 Materiální škody

Prach a výpary vzniklé od technologických procesů má v první řadě negativní vliv na zdraví člověka. V druhé řadě poškozuje výrobní stroje, případně samotné výrobky. Následkem jsou rozsáhlé prostoje při opravě, tím zkrácení produkce nebo zničení výrobků. Všechny důsledky se nakonec projeví zvýšením nákladů.

1.2 Větrání

Principem větrání je výměna vzduchu znehodnoceného za čerstvý vzduch. Proudění vzduchu ve větraném prostoru je způsobeno nuceným, mechanickým pohybem (ventilátory), nebo přirozeným tlakovým rozdílem (vlivem rozdílných hustot vzduchu vně a uvnitř větraného prostoru případně účinkem větru); rozlišuje se:

- přirozené větrání
- nucené (mechanické) větrání

1.2.1 Nucené (mechanické) větrání

Podle toho, zda vzduch odváděný z místnosti se vyměňuje za vzduch venkovní v celém prostoru, nebo pouze v jeho části dělíme nucené větrání na celkové větrání, místní přívod vzduchu a místní odsávání.

- Celkové nucené větrání

Všeobecné větrání nazývané také větrání zředěním, poskytuje čerstvý proud vzduchu do oblasti a následně znečištěný proud vzduchu z oblasti, kde se pracuje. Zajišťuje pokud možno rovnoměrné provětrávání pracovních oblastí. Používá se především tam, kde nevýrazné zdroje škodlivin jsou v prostoru rovnoměrně rozmístěny. Nevýhodou je, že neumožňuje přímo ovládat zdroj znečištění. Všeobecné větrání nezachycuje škodliviny, ale odstraňuje je přímo do vzduchu. Tím umožňuje kontaminující látky vstupovat do ovzduší pracoviště a tak dochází k ředění koncentrace kontaminující látky na přijatelnou úroveň.

- Místní přívod vzduchu

Slouží k lokální úpravě čistoty nebo teploty vzduchu, patří sem vzduchové clony, vzduchové sprchy a vzduchové oázy.

- **Místní odsávání**

Se zřizuje všude, kde na ohraničených místech dochází k uvolňování škodlivin, nebo nadměrné teplo u stojů a technických zařízení. Odsávaný vzduch musí být nahrazován přiváděným vzduchem z venku, který je nutné v zimním období ohřívat.

Odsávání, které zachycuje znečištění přímo při jeho vzniku a odstraňuje ho z pracoviště, ještě než může být vdechnuto obsluhou. Je navrženo tak, aby zachycovalo kontaminující látku přímo u zdroje, nebo v blízkosti zdroje. Využívá se hlavně pro odstranění zplodiny ze svařování a pájení.

Ventilační systém je obvykle složený z následujících částí: ventilátor, potrubí, filtry a zásobník na zplodiny. Systém se liší způsobem vedení, které je vyvedeno ven, nebo do zásobníku.

1.2.2 Přírozené větrání

Podobně jako u nuceného větrání lze přírozené větrání rozdělit na celkové větrání a místní odsávání.

- **Celkové přírozené větrání**

Je využíváno k větrání průmyslových budov s velkými vnitřními tepelnými zisky, nazývané větrání aerací.

- **Místní přírozené odsávání**

K přírozenému odvodu vzduchu slouží šachtové větrání. Odvod vzduchu z místností rovněž přispívá k výměně vzduchu v celém prostoru. Vzduch do prostoru vybaveného šachtovým větráním proniká vlivem přírozeného podtlaku, zpravidla ze sousedních místností.

1.3 Příklady řešení podle použité technologie

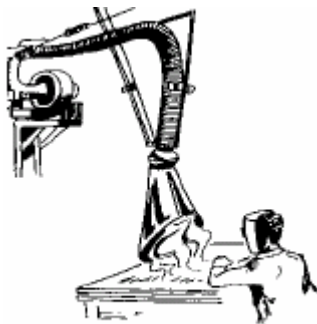
Uvažujeme významné technologie jako pájení v elektrotechnickém průmyslu, svařování případně termické řezání kovů. Další použití odsávacích systémů je například: odsávání

výfukových plynů při měření emisí motorových vozidel, případně jiné, kde je nutné odsávat vzniklé škodliviny. Tím, se zabývat nebudeme, v případě zájmu nahlédněte na odkazovou literaturu.

Obecně lze zařízení pro odsávání zplodin rozdělit na:

- mobilní
- stacionární

U stacionární jednotky je rameno přímo upevněno v místě pracoviště viz obr1. Celý systém je dostupný v různých rozsazích a rozměrech, konstrukce může být nainstalována na zeď, stůl, strop.



Obr. 2 Stacionární jednotka

Pro větší flexibilitu se používají pohyblivé jednotky s filtrem viz obr2. Jednotky se podobají „vysavači“.



Obr. 3 Mobilní jednotka

1.3.1 Ruční pájení

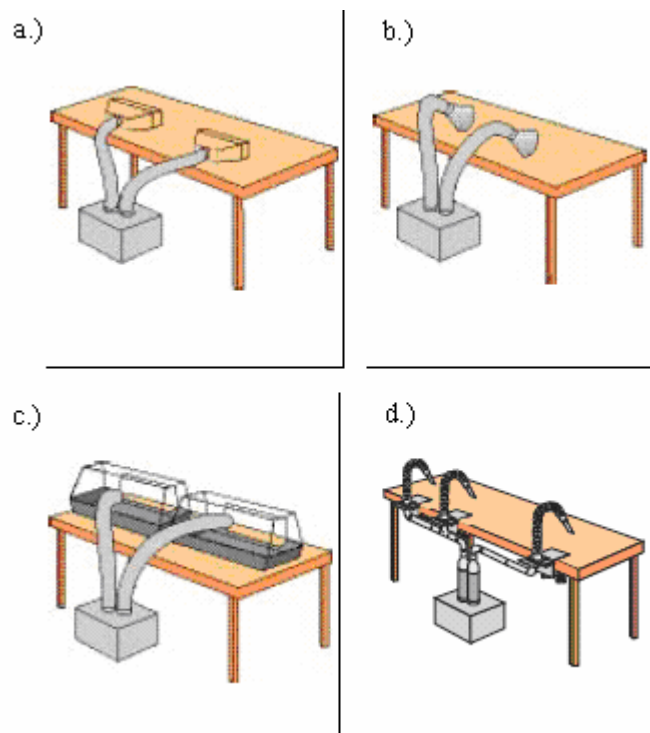
Pájení je proces, při kterém vznikají dýmy, plyny a aerosolové částice, které mohou ohrozit zdraví obsluhujícího pracovníka. Různě nebezpečné látky, které mohou být vysoce toxické, vznikají podle druhu použitých materiálů, přísad a teploty pájení. Proto je nutné takto

vzniklé zplodiny odsávat, nejlépe přímo při jejich vzniku. Firma PUREX nabízí několik možných řešení.

- sací a filtrační zařízení pro 1 až 2 pracoviště

Sada je složena ze sacího a filtračního zařízení, dvou odsávacích ramen se štěrbinovou dýzkou, držáku pro stolní montáž a příslušných spojovacích hadic. Samotné umístění zařízení a připojení odsávacích ramen, která jsou uchycena konzolou na stole, je jednoduché.

Na obou odsávacích ramenech lze zajistit dostatečný výkon odsávání, díky plynulé regulaci. Řídící systém umožňuje kontrolovat a následně signalizovat nasycenost filtrační vložky, takže je stále zaručeno bezpečné odsávání vzniklých zplodin. Na následujícím obrázku vidíme používané typy nadstavců.



Obr. 4 Typy nadstavců

- a.) přetlakový systém
- b.) kuželový systém
- c.) Kabinkový systém
- d.) Systém s ramenem

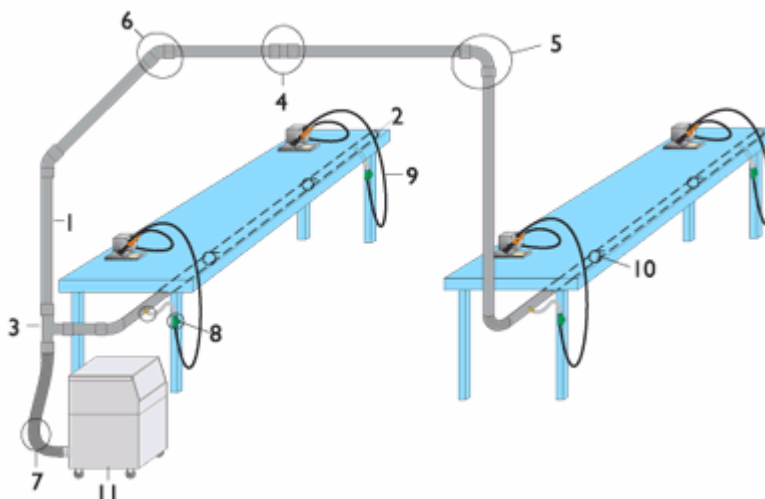
Zařízení je možné dále rozdělit na stacionární a mobilní. V praxi se používá například jednotka typu exPOD:

Tab. 1 Parametry stacionární a mobilní odsávací jednotky typu exPOD

	Stacionární		Mobilní
Výkon motoru:	0,14 kW	0,14 kW	0,14 kW
Napěťová soustava:	230 V / 50 Hz	120 V / 50 Hz	230 V / 50 Hz
Hladina akustického tlaku:	52 dB(A)	55 dB(A)	52 dB(A)
Rozměry :	š = 340 mm	š = 340 mm	š = 1100 mm
	h = 300 mm	h = 300 mm	h = 300 mm
	v = 300 mm	v = 300 mm	v = 300 mm
Hmotnost zařízení:	12,5 kg	12,5 kg	14,5 kg

- centrální sací a filtrační zařízení pro více než 2 pracoviště

Možné řešení vidíme na obr .5 jedna odsávací jednotka odsává dým z více pracovních pozic. Pájka s možností odsávání kouře, umožňuje rychlou změnu pracoviště, pomocí rychloupínací spojky. Nevyužitá pájecí stanice jsou odpojeny pomocí kohoutků. Používaná jednotka automaticky reguluje rychlost ventilátoru, a tím zaručuje konstantní rychlost proudu vzduchu do všech pájecích stanic, které jsou v provozu.



Obr. 5 Princip odsávání zplodin pro více pracovišť

1-anti-statická trubka, 2-přístup, 3-T rozbočka, 4-přímá spojka, 5-oblouk 90°, 6-oblouk 45°, 7-pružná spojovací hadice, 8-napojení ON/OFF kohoutku, 9-silikonová hadice, 10-navázání kabelu, 11-odsávací jednotka.

210 Powerflow Tip Extraktor:

Jednotka umožňuje odsávání až z 50 pracovišť ručního pájení nebo automatického pájecího zařízení, automaticky řídí průtok a jednoduše se ovládá pomocí grafického displeje. Zařízení disponuje kombinovaným plynovým mechanickým filtrem. Odsávané množství je možné regulovat pomocí škrtkovací klapky v sacím potrubí.

Veškeré funkce zařízení neustále monitoruje řídicí systém a v případě poruchy nebo nasycenosti filtrů dojde k optické popřípadě akustické signalizaci. Vyčištěný vzduch je podle potřeby přiváděn zpět do místnosti nebo odváděn potrubím do venkovní atmosféry.



Obr. 6 Jednotka 210 Powerflow Tip Extraktor

1.3.2 Svařování

Svařování je spojování kovů podobných vlastností taveninou podobnou vlastnostmi spojovaným kovům. Při tomto procesu vzniká ohromné množství nejrůznějších zplodin, které je nutné vhodným způsobem z místa pracoviště odsávat.

- Mobilní odsávací a filtrační zařízení

Jednotky jsou vhodné pro použití u nestálých svářečských pracovišť, kde hlavním důvodem je flexibilita. Vyznačují se jednoduchou avšak robustní konstrukcí.

Mechanický pojízdný filtr:

Popis jednotky:

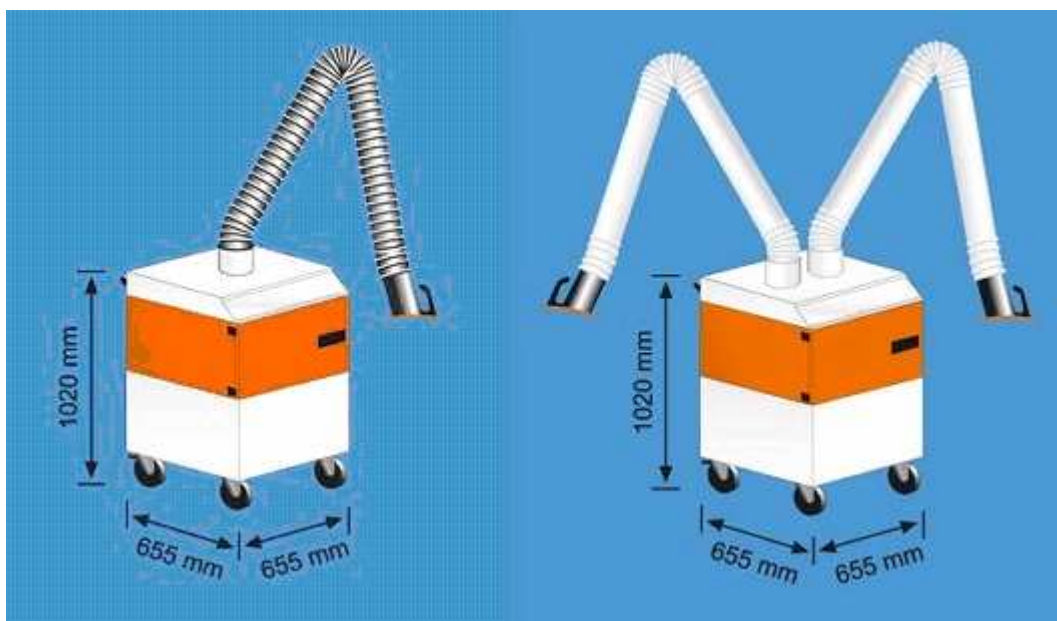
Hlavní část tvoří trubková nebo hadicová ramena délky 2m, 3m a 4m, která poskytují velký akční rádius. Na tuto jednotku je možné připojit až dvě odsávací ramena. Odsávací rameno

tvoří paralelogramová profilová konstrukce se vzpěrnými pružinami a odsávací hadicí, kterou je možné otáčet o 360°. Rameno lze umístit a stabilizovat v žádané poloze. Veškeré obslužné a kontrolní prvky jsou přehledně uspořádány na displeji obslužného panelu.

Zařízení může být na přání vybaveno nejrůznějším sortimentem doplňků jako například Start-Stop automatikou, osvětlením pracoviště, chemickým filtrem na bázi aktivního uhlí.

Princip filtru:

Vzduch obsahující škodliviny, který je zachycen odsávací hubicí je v předfiltrační části zbaven hrubých nečistot a proudí dále přes navazující hlavní filtr. Takto vyčištěný vzduch je přiváděn zpět do pracovního prostoru.



Obr. 7 Pojízdňé jednotky s odsávacím ramenem

Cena:

Pohybuje se okolo 70 000Kč do 90 000Kč a závisí na délce použitého ramene.

Jednotky jsou konstruované pro různé výkony.

Tab. 2 Technické parametry jednotek

Výkon ventilátoru	Příkon motoru
270m ³ /h	1,1 kW . 3x 400 V . 50 Hz
280m ³ /h	1,1 kW . 230 V . 50 Hz
320m ³ /h	1,2 kW . 230 V . 50 Hz
340m ³ /h	1,6 kW . 230 V . 50 Hz

2200m ³ /h	1,1 kW . 230 V, 3x 400 V. 50 Hz
2500m ³ /h	1,1 kW . 230 V ,400 V. 50 Hz
3000m ³ /h	1,5 kW . 3x 400 V. 50 Hz
3500m ³ /h	2,2 kW . 400 V. 50 Hz

- Stacionární odsávací a filtrační zařízení

Stacionární mechanická zařízení pro odsávání zplodin ze svařování jsou používány pro aplikaci na trvale instalovaných svářecích pracovištích, ve svářecích kabinách nebo v učňovských dílnách. Zařízení se vyrábí s odsávacím ramenem, nebo jeřábem.

Elektrostatický filtr s odsávacím jeřábem:

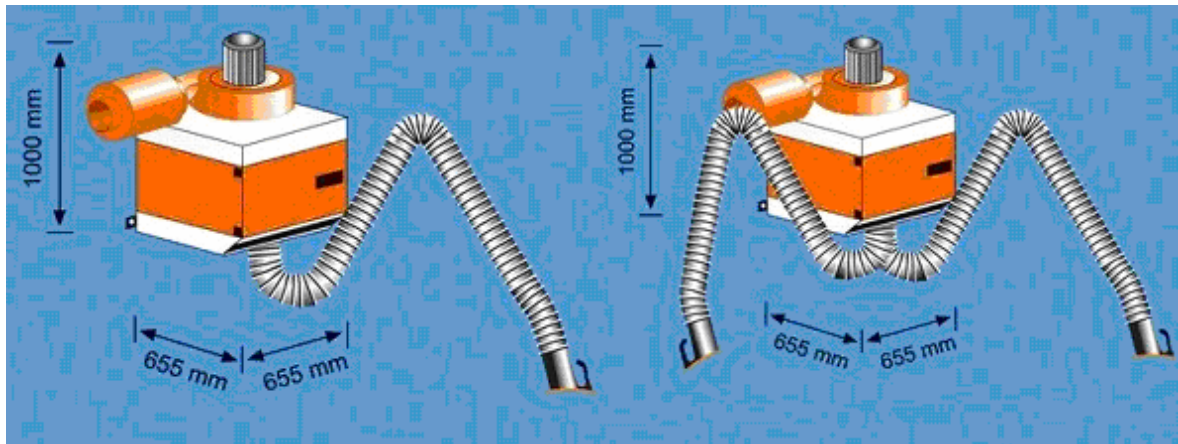
Díky jeřábu má zařízení větší akční rádius.

Popis jednotky:

Jeřáb má délku 3m, 4,5m nebo 6 m je uchyceny na druhé konzole a složen ze dvou částí, které jsou otočné a uloženy v kuličkových ložiskách. Výšku u otočné odsávací hubice můžeme přizpůsobit pomocí teleskopického mechanismu, takže lze vždy nastavit optimální polohu zachycování škodlivin. Na zadním výložníku může být upevněno břemeno do hmotnosti 50kg, přední výložník má nosnost do 10kg. Odsávací jeřáb je vyráběn i s větším průměrem 250mm, kde mechanický filtr je vybaven výkonnějším ventilátorem. Zařízení je možné použít i se dvěma odsávacími jeřáby.

Princip filtru:

elektrostatický filtr odlučuje vzduch obsahující prachové částice podle principu elektrického náboje. Vzduch obsahující škodliviny je v předfiltru zbavován hrubých nečistot, následně je v ionizátorové části filtračního článku nabíjen a částice se usazují na kolektorových deskách s opačným nábojem.



Obr. 8 Stacionární jednotky s odsávacím jeřábem

Cena:

Cena je stanovena podle délky použitého jeřábu od 150 000Kč do 250 000Kč.

1.3.3 Termické řezání kovů

Do této technologie spadá řezání plazmou nebo plamenem a řezání laserem.

Speciálně pro tyto technologie řezání kovů existuje řada odsávacích zařízení.

Systém 8000 od firmy KEMPER

Funkce:

Vzduch který obsahuje škodlivé látky je nasáván potrubím. Na povrchu filtračního média dochází k separaci prachových částic. Tvorba prachové vrstvy je monitorována inteligentním řídicím systémem a při dosažení její hraniční hodnoty očistí filtrační patrony pomocí tlaku vzduchu. Přičemž zařízení nemusí přerušit svůj provoz. Uvolněné prachové částice spadnou do sběrného zásobníku.

Řídicí systém:

Inteligentní řídicí systém na bázi Simatic S7 firmy Siemens je jádrem odsávacích a filtračních zařízení. Všechny funkce je možné vyvolat pomocí ovládacího panelu.

Integrovaný diagnostický systém dohlíží na bezvadnou funkci zařízení a hlásí případné poruchy prostřednictvím textového displeje.

Regulace:

K přesné regulaci se využívá alternativních odsávacích a filtračních zařízení, regulující sací výkon podle potřeby vede k optimálnímu přizpůsobení výkonu a velkému snížení provozních nákladů. Sensory kontrolují potřebný sací výkon a frekvenční měnič reguluje počet otáček ventilátoru. Systém funguje na principu: tolik, kolik je potřeba, tak málo, jak

je možné. Tím dochází k významnému snížení spotřeby elektrické energie a opotřebení zařízení. Potřebné dodatečné pořizovací náklady se amortizují v maximálně krátkém čase.

Propojení:

Optimální propojení zajišťují nízkonapěťové kontakty, kterými lze řídicí systém filtračního zařízení integrovat do jiných řídicích systémů, například do zařízení pro řezání laserem. Tím dochází k odsávání jen když je potřeba a minimalizují se tak náklady. Je možné prostorově oddělit řízení od filtračního zařízení. Spojením pomocí modemu lze provádět dálkovou diagnostiku

Povrchové odlučování:

Filtrační patrony pracují na principu povrchové filtrace. To znamená, že odlučované prachové částice se nemohou dostat do filtračního média. Pro dosažení povrchové filtrace je na filtračním médiu nalaminována teflonová membrána.

Čištění:

Velkou výhodou povrchové filtrace je možnost odčišťování používaných filtračních patron. K tomu dochází pomocí tlaku vzduchu během provozu zařízení. Tímto je zaručen nepřerušovaný provoz zařízení a čištění filtračních patron probíhá tehdy, je-li potřeba. Celý proces kontroluje a řídí mikroprocesorový řídicí systém.

Likvidace prachu:

V okamžiku, kdy jsou prachové částice čištěním odděleny od filtračních patron, spadnou do sběrného prachového zásobníku. Odtud lze částice pohodlně vyjmout a zlikvidovat. Systém 8000 používá jednu nebo dvě sběrné prachové nádoby.

Zařízení se vyrábí pro sací výkony od 2000-3000 m^3/h do 10 000 -13 000 m^3/h



Obr. 9 Typy jednotek - systém 8000

Tab. 3 Technické parametry jednotek typ – systém 8000

Sací výkon:	2.000 - 3.000 m ³ /h dle velikosti zařízení	10.000 - 13.000 m ³ /h dle velikosti zařízení
Podtlak:	2.500 Pa	2.500 Pa
Ventilátor:	radiální ventilátor, s přímým pohonem	radiální ventilátor, s přímým pohonem
Výkon motoru:	1,5 kW	7,5 - 11,0 kW dle velikosti zařízení
Napěťová soustava:	3 x 400 V / 50 Hz	3 x 400 V / 50 Hz
Jmenovitý proud:	3,25 A	13,8 - 20,8 A
Hladina akustického tlaku:	< 65 dB(A)	< 65 dB(A)
Filtrační materiál:	Netkaná textilie s nalaminovanou ePTFE-membránou	Netkaná textilie s nalaminovanou ePTFE-membránou
Stupeň odlučivosti:	> 99,98 %	> 99,98 %
Klasifikace použití dle BGIA:	L, M	L, M
Čištění:	pneumaticky pomocí rotačních dýz	pneumaticky pomocí rotačních dýz
Objem sběrné prachové nádoby:	34 litrů	192 litrů
Rozměry :	š = 962 mm, h = 962 mm, v = 2.110 mm	š = 2.375 mm, h = 1.864 mm, v = 2.110 mm
Hmotnost filtračního zařízení:	390 - 410 kg podle systému	1.160 - 1.230 kg podle systému

1.3.4 Technologický princip čištění vzduchu

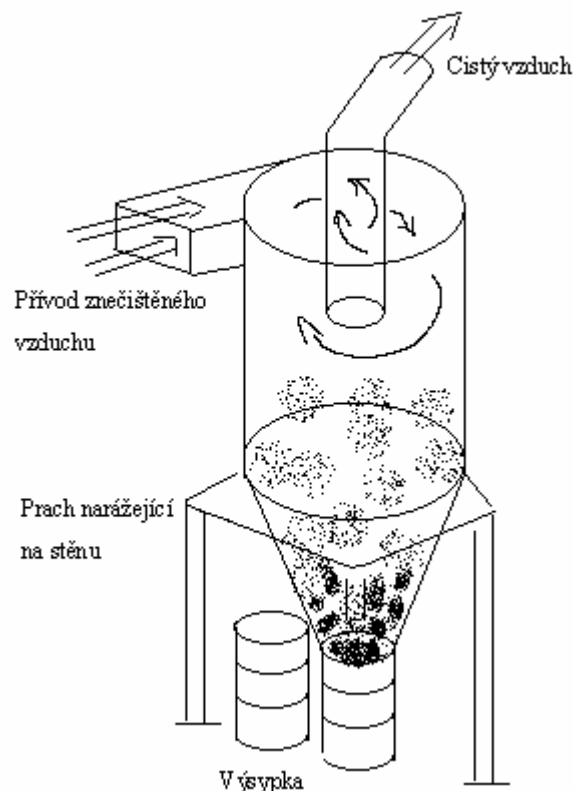
Vypouštění do životního prostředí je možnost jak odstranit kontaminující látky z oblastí, kde se pracuje. Je to účinná metoda jak snižovat koncentrace toxických průmyslových odpadních látek. Nicméně pro některé látky přímé odstranění nemusí být v souladu se zákony ochraňující životní prostředí.

Škodliviny ze znečištěného proudu vzduchu mohou být odstraněny pomocí různých fyzikálních procesů. Používají se cyklony, elektrostatické odlučovače a filtry.

Typ zařízení volíme podle charakteristiky částic, zahrnující velikost, tvar, rozložení, reaktivitu. Další faktory, které ovlivňují charakteristiku toku proudu jsou: tlak, teplota, viskozita, rychlost toku, odpor vzduchu.

- Cyklon

Zařízení ve tvaru převráceného kužele, v němž se na principu odstředivé síly odlučují hrubší tuhé částice z proudu plynu.



Obr. 10 Čištění znečištěného vzduchu pomocí cyklonu

Znečištěný vzduch proudí dovnitř válcové komory velkou rychlostí, kde se točí do spirály a vzniká tak vír. Větší částice jsou díky větší setrvačnosti přinuceny se pohybovat proti zdi komory. Vyčištěný vzduch stoupající v úzké spirále uvnitř válce se odvádí k dalšímu zpracování. Odstředěné částice spadnou do výsypky.

Tab. 4 odlupčivost cyklónových odlučovačů

cyklon průměr [mm]	velikost částic [mm]	účinnost [%]
40-150	5	70-90
40-150	10	85-95
40-150	20	95-98
1000	5	85-94
1000	10	95-99
1000	20	99-99,8

- Pračka

Odstraňuje jemné pevné nebo kapalně částice ze špinavého proudu vzduchu srážením a unášením nespočetným množstvím malých kapiček. Ve sprchovací věži pračky je stoupající proud vzduchu vyčištěn vodní sprchou z které tryská voda ze série trysek. Aby se zabránilo ucpání trysek, je obíhající voda dostatečně vyčištěna. Efektivita pračky závisí na relativní průtokové rychlosti mezi kapičkami a pevnou nebo kapalnou částicí.

- Elektrostatické odlučování

V elektrostatickém odlučovači složky, které jsou suspendovány v proudu vzduchu dostanou elektrický náboj. Jednotka je složena z rozvodů které dodávají proud vzduchu, vykládka, sběracích elektrod, systém pro čištění, zásobníku na odpad. Vysoké Stejnoseměrné napětí okolo 100 000V je přiložené na propouštěcí elektrody. Prachové částičky jsou nabitý a následně přitaženy k opačně nabitým sběracím elektrodám na které se zachytí. Elektrostatické jednotky mají účinnost filtrace kolem 98%.

- Filtrační odlučování

Odstraňuje pevné nebo kapalně částice do filtračních pytlů. znečištěný vzduch je vháněn nahoru přes spodní část ventilátorem. Jemné pevné nebo kapalně částičky jsou zachyceny uvnitř filtračního pytlíku, zatímco čistý vzduch prochází látkou na vrcholu pytle. Filtr odstraní téměř 100 % složek velikosti 1 μm .

2 TEORIE SPOJENÁ S ODSÁVÁNÍM ŠKODLIVIN

2.1 Ventilátory

Ventilátory jsou oběžné dynamické stroje, které zvyšují tlaku vzduchu nebo jiného plynu. Každá část ostří vrtule ventilátoru uděluje puls energie a vytváří tak proudění vzduchu. Velikost, geometrie ostří a úhlové rychlosti rotoru určují frekvenci pulsu proudu vzduchu a vyprodukovaný hluk. Stejnoměrná rychlost vnější špičky vrtule větráku je ovlivněna výběrem materiálu a návrhem rotační části. Požadovaný výkon ventilátoru je pro každou aplikaci jiný a závisí na tvaru lopatky oběžného kola, složitost, rozměry, konstrukční materiály, úhlová rychlost a tvar uzavření. Ventilátory se využívají převážně pro vyčerpání vydýchaného nebo znečištěného vzduchu, nebo k přesunu vzduchu uvnitř prostor budov. Levné ventilátory tvoří řezné listy ploché oceli. Ostří může být placaté nebo mírně zakřivené. Vidíme je například v domácích potřebách nebo u chladičů a ventilací ve vozidlech.

Dražší ventilátory mají profil ostří příčného řezu a vysokotlakou spirální skříň, mohou dosahovat velkých rychlostí a jsou použity u aplikacích využívajících velký tlak a proud vzduchu.

2.1.1 Rozdělení ventilátorů

Podle způsobu a směru průtoku vzduchu existují ventilátory axiální, radiální, diagonální a diametrální. Další možné rozdělení je podle velikosti celkového tlaku a to na ventilátory nízkotlaké do 1kPa, středotlaké do 3kPa a vysokotlaké nad 3kPa.

- Axiální ventilátory

Využívají princip vrtule. Směr proudění přes oběžné kolo s lopatkami vrtule je rovnoběžný s osou rotoru. Pro dosažení vysokého stupně účinnosti, jsou rotující lopatky složitě tvarovány. Ventilátor funguje tak, že nasávaný vzduch proudí stále z jedné strany z atmosféry do vstupu. Vnější skříň přitom plní funkci sacího trychtýře. Na výtlačné straně je vzduch vytlačován ve směru osy. K tomu slouží lopatky ventilátoru, které vzduch jakoby protlačují ventilátorem.

Axiální ventilátory se používají převážně pro nízké tlaky a velká množství vzduchu.

Hlavními oblastmi použití jsou přitom větrání, vytápění a chlazení.

- Radiální ventilátory

U tohoto typu ventilátoru se vzduch při proudění obrací o 90° . Dále se dělí na ventilátory s volně oběžným kolem a skříňové ventilátory, u nichž dochází k přeměně tlaku ve spirálové komoře.

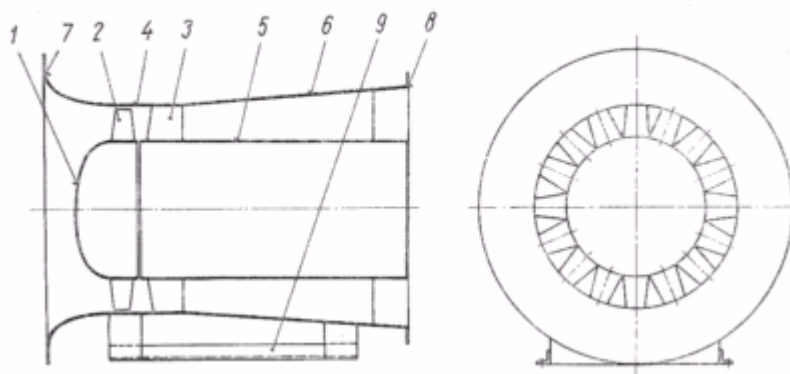
Radiální ventilátory se používají pro vyšší tlaky a střední objemové průtoky. Kromě toho jsou velmi vhodné pro začlenění do potrubních systémů. Oblasti použití jsou velmi různorodé, a to větrání a odvětrávání, chlazení a klimatizace.

2.1.2 Hlavní části ventilátorů

Ventilátor je složen z těchto základních částí: rotoru, skříně, základového rámu se stoličkami, pohonu, popřípadě převodového ústrojí.

Rotor je složen jednoho nebo více oběžných kol, hřídele a řemenice. Uvnitř skříně ventilátoru je umístěné oběžné kolo. Skříň, ložiskové a motorové stoličky nese základový rám.

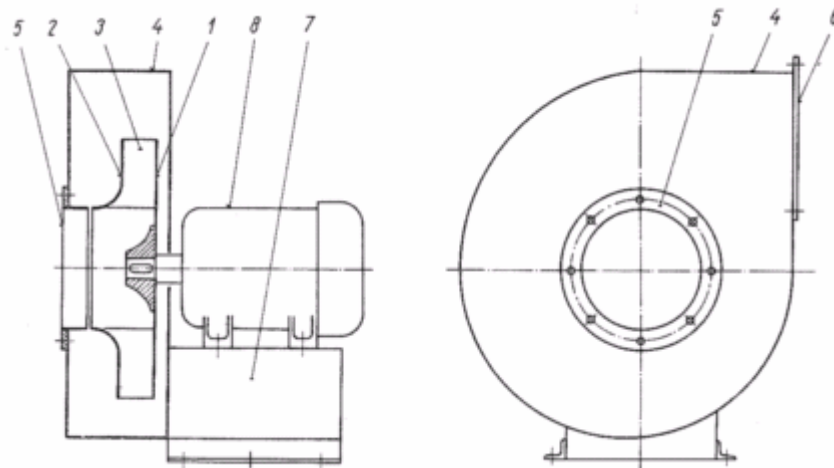
U axiálních ventilátorů je oběžné kolo složené z nosného kotouče a lopatek. Jeho vlastní stupeň je uložen ve skříně na kterou navazuje přímý difuzor kruhového průřezu viz Obr. 11



Obr. 11 Axiální ventilátor

1-nosný kotouč (náboj) oběžného kola, 2-lopatky oběžného kola, 3-rozváděcí lopatky, 4-skříň, 5-jádro difuzoru, 6-plášť difuzoru, 7-sací hrdlo, 8-výtlačné hrdlo, 9-základový rám.

Oběžné kolo radiálního ventilátoru je umístěné ve spirální skříně a skládá se z nosného a krycího kotouče a lopatek viz Obr.12



Obr. 12 Radiální ventilátor

1-nosný kotouč oběžného kola, 2-krycí kotouč oběžného kola, 3-lopátky oběžného kola, 4-spirální skříň, 5-sací hrdlo, 6-výtlačné hrdlo, 7-stolička se základním rámem, 8-motor.

2.1.3 Charakteristiky ventilátorů

Ventilátory jsou charakterizovány objemovým průtokem vzduchu V , celkovým dopravním tlakem Δp , výkonem a příkonem a konečně ohřátí vzduchu ve ventilátoru Δt . Dynamické vlastnosti ventilátoru určuje tlaková, příkonová a účinnostní charakteristika, ukazující závislost daného parametru na objemovém průtoku vzduchu.

Ventilátor připojený do sítě pracuje podle charakteristiky pracovního bodu, který je průsečíkem tlakové charakteristiky ventilátoru a charakteristiky sítě. Tlaková

charakteristika ventilátoru je závislost dopravního tlaku Δp na průtoku V při konstantních otáčkách n a standardní hustotě vzduchu ρ . Potrubí se zařízením k úpravě vzduchu má přibližně parabolickou závislost přetlaku Δp potřebného k dosažení průtoku

V sítě $\Delta p = C V^2$, kde C je konstanta sítě.

Při jiných otáčkách n_1 , jiné hustotě ρ_1 , jiném průměru oběžného kola d_1 se změní dopravní tlak a průtok takto:

$$\Delta p_1 = \Delta p \left(\frac{\rho_1}{\rho} \right) \left(\frac{n_1}{n} \right)^2 \left(\frac{d_1}{d} \right)^2 \quad (1)$$

Δp – rozdíl dopravovaného tlaku [Pa]

ρ - hustota vzduchu [kg/m^3]

n – otáčky ventilátoru [1/s]

d - průměr oběžného kola [m]

$$\dot{V}_1 = \dot{V} \left(\frac{n_1}{n} \right) \left(\frac{d_1}{d} \right)^3 \quad (2)$$

\dot{V} - objemový průtok [m^3/s]

a příkon ventilátoru:

$$P_1 = P \left(\frac{n_1}{n} \right)^3 \left(\frac{\rho_1}{\rho} \right) \left(\frac{d_1}{d} \right)^5 \quad (3)$$

P – příkon ventilátoru [w]

Porovnání různých typů ventilátorů a velikostí umožňují bezrozměrná čísla:

$$\Psi = \frac{\Delta p_{cv1}}{\left(\frac{\rho \cdot u_2^2}{2} \right)} \quad (4)$$

Ψ - tlakové číslo [-]

u_2 - obvodová rychlost [m/s]

$$\varphi = \frac{\dot{V}}{\left(\frac{\pi \cdot d_2^2 \cdot u_2}{4} \right)} \quad (5)$$

φ - průtokové číslo [-]

$$\lambda = \frac{\varphi \cdot \Psi}{\eta_c} \quad (6)$$

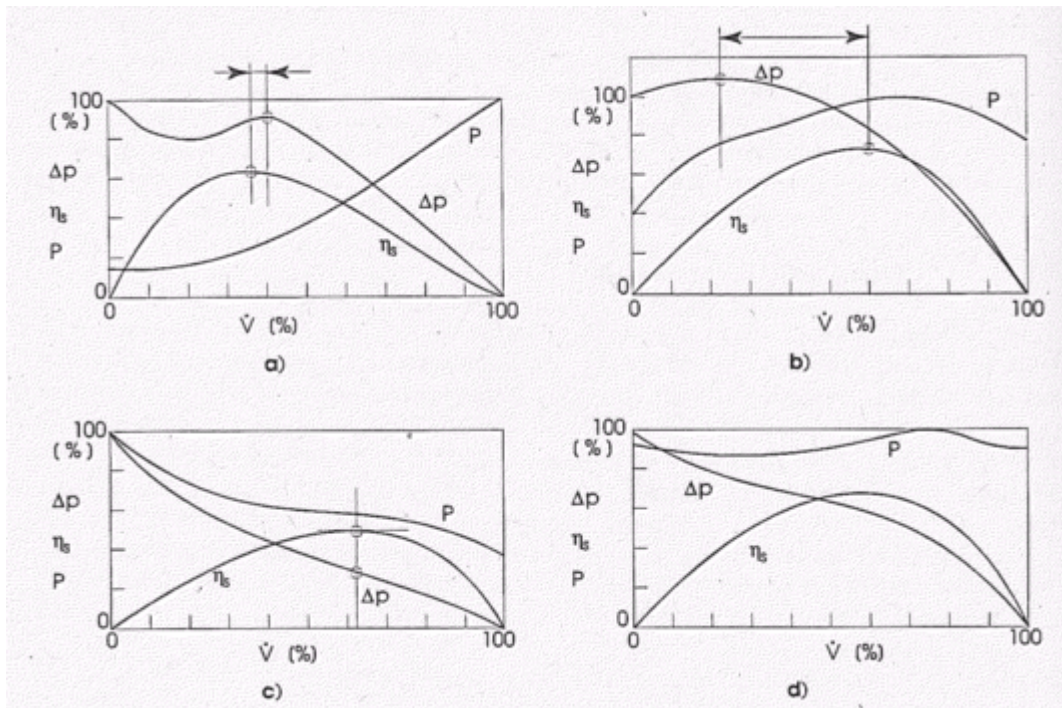
λ - výkonové číslo [-]

η_c - celková účinnost ventilátoru [-]

Závislost $\psi = f(\varphi)$ je bezrozměrná tlaková charakteristika. Procentní charakteristiky

ventilátorů zobrazují závislosti celkového dopravního tlaku, příkonu a účinnost na

objemovém průtoku, v nichž jsou tyto veličiny uvedeny v poměru ke krajním stavům jako nulový tlak – maximální průtok a naopak nulový průtok a maximální tlak.



Obr. 13 Procentní charakteristiky ventilátorů

Na obrázku 13 vidíme průběhy procentních charakteristik čtyř nejužívanějších typů ventilátorů. Ukazují závislost statického tlaku Δp , příkonu P a statické účinnosti

$$\eta_s = \frac{P}{\Delta p \cdot V} \quad \text{na objemovém průtoku } V, \text{ kde } \rho \text{ a } n \text{ jsou konstanty, pro ventilátory:}$$

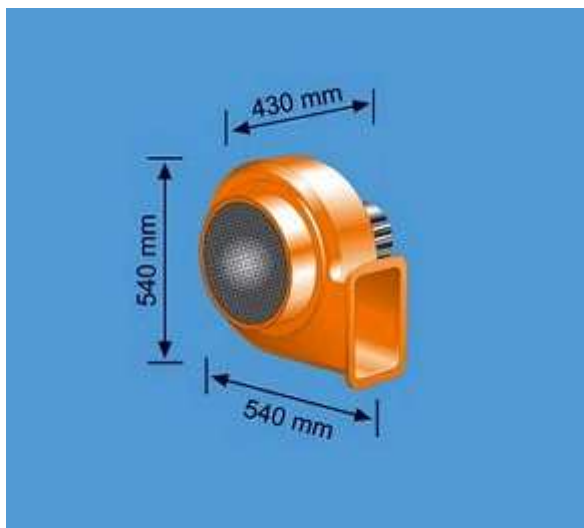
- radiální s dopředu zahnutými lopatkami – nízkotlaké
- radiální s dozadu zahnutými lopatkami – středo a vysokotlaké
- šroubové
- axiální vícelisté

2.1.4 Ventilátory používané v praxi

- Ventilátory série M, H

Ventilátory se používají pro připojení odsávacích, teleskopických ramen a odsávacích jeřábů. Skříň a oběžné kolo je ze siluminového odlitku odolného proti jiskrám.

Vynikajících točivých vlastností při nízké hladině akustického výkonu je dosaženo statickým a dynamickým vyvážením oběžného kola. Ventilátor je upevněn přímo na nástěnnou konzolu odsávacího ramene, teleskopického ramene nebo odsávacího jeřábu.



Obr. 14 Ventilátor

Tab. 5 Typy používaných ventilátorů

Ventilátory série M	1.000 m ³ /h - 0,55 kW - 3 x 400 V - 50 Hz
	1.000 m ³ /h - 0,55 kW - 1 x 230 V - 50 Hz
	1.000 m ³ /h - 0,55 kW - 3 x 500 V - 50 Hz
	2.000 m ³ /h - 0,75 kW - 3 x 400 V - 50 Hz
	2.000 m ³ /h - 0,75 kW - 1 x 230 V - 50 Hz
	2.000 m ³ /h - 0,75 kW - 3 x 500 V - 50 Hz
	2.200 m ³ /h - 1,10 kW - 3 x 400 V - 50 Hz
	2.200 m ³ /h - 1,10 kW - 3 x 500 V - 50 Hz
Ventilátory série H	3.000 m ³ /h - 1,50 kW - 3 x 400 V - 50 Hz
	3.000 m ³ /h - 1,50 kW - 3 x 500 V - 50 Hz
	3.000 m ³ /h - 1,50 kW - 1 x 230 V - 50 Hz

Princip proudění ve spirální skříni je uveden v příloze.

2.2 Rozvody odsávání

2.2.1 Konstrukce vzduchodů

Vzduchovody se převážně vyrábějí z tenkého ocelového pozinkovaného plechu. Tloušťku plechu volíme podle rozměrů potrubí a skupiny charakterizující provozní podmínky.

Životnost u pozinkovaných vzduchodů je 20 až 25 let a je možné ji zvýšit ochrannými nátěry proti korozi.

Tab. 6 Rozměry potrubí z ocelového plechu

Průměr	tloušťka					
	skupina					
	I		II		SPIRO	VTK
ø		ø				
<u>70</u>					-	-
<u>80</u>						
<u>90</u>		-		-		
100			0,8			
<u>110</u>						
125					0,5	0,8
140						
160						
180						
200		0,6		1		1
<u>225</u>			1			
250	0,5					
280						
315						
355						
400			1,3	1,3	0,7	
450	0,6	0,8	1,5	1,5	0,9	-

Podtržené rozměry nejsou doporučené pro čtyřhranné potrubí. SPIRO potrubí se vyrábí podle potřeby v délkách až do 4 metrů.

Vzduchovody jsou kruhového nebo čtyřhranného průřezu. V následující tabulce je jako příklad uvedeno srovnání čtyřhranného potrubí s kruhovým o stejném průtoků média 2600m³/h a stejném průřezu 0,12m².

Tab. 7 Porovnání čtyřhranného potrubí s kruhovým

Průřez potrubí	m	obvod %	poměr stran	hmotnost %	tlaková ztráta%	cena za montáž%
kruhový	d = 0,4	89	-	66	90	66
čtvercový	0,355 x 0,355	100	1	100	100	100
obdelníkový	0,25 x 0,5	106	2	116	107	114
	0,16 x 0,8	135	5	158	143	174
	0,1 x 1,25	190	12,5	231	222	350

Vidíme, že je výhodnější použít potrubí kruhového průřezu. U kruhových vzduchovodů dochází k menšímu zanášení prachem a jsou zdrojem menšího aerodynamického hluku. Díky tomu jimi může proudit vzduch o větší rychlosti.

Ke změně směru a rychlosti nebo k rozdělení či spojení proudů vzduchu se používají tvarovky. Tvar oblouků, kolen, přechodů a rozboček je takový, aby tlakové ztráty byly co nejmenší. U oblouků při odsávání vzduchu s prachem je $R = 1,5d$ a pro pneumatickou dopravu $R = 3d$. Do průměru $d = 200\text{mm}$ jsou oblouky hladké, pro větší průměry skládané z dílů po 15° . Ztrátový součinitel atypických čtyřhranných oblouků zmenšíme tím, že do něj vložíme vodící plechy na:

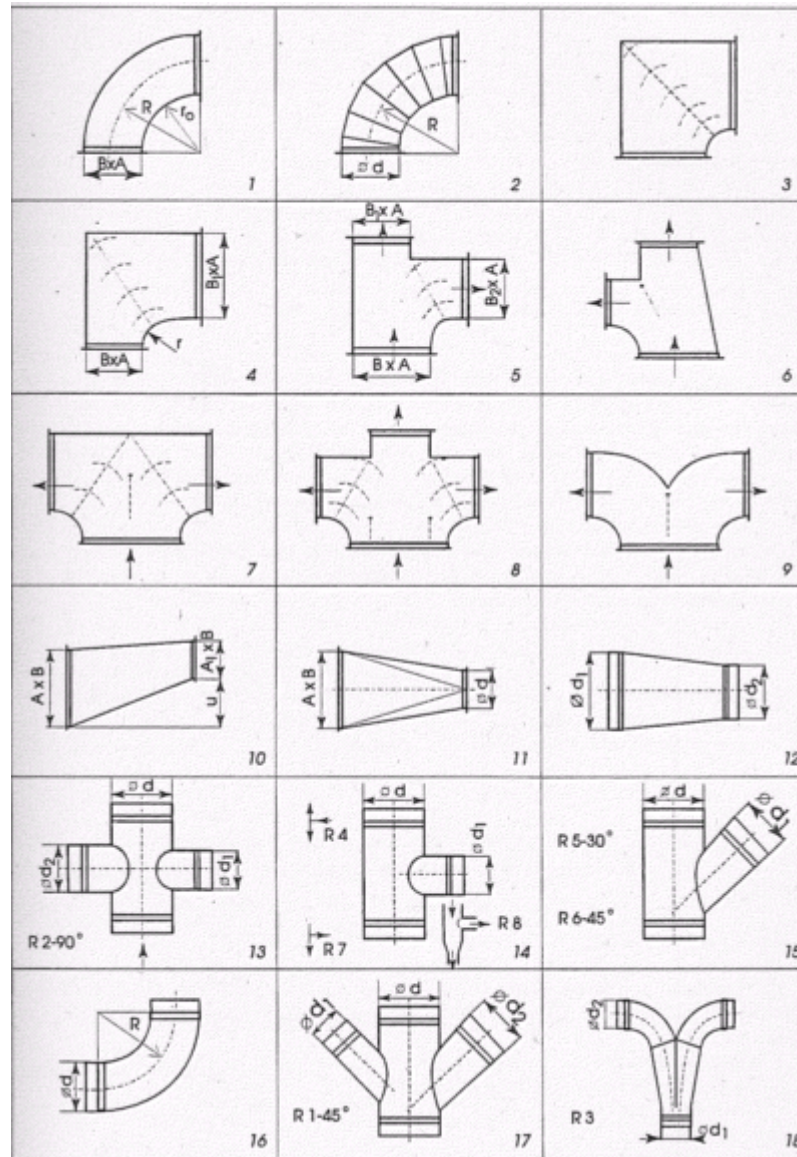
$$\xi = \left(\frac{0,46R}{B + 0,04} \right) \xi_0 \quad (12)$$

ξ_0 - ztrátový součinitel oblouku bez plechů [-]

R - tepelný odpor [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]

B - charakteristické číslo [Pa]

Kolena ostrá, bez vnitřního zaoblení nebo zkosení mají velkou tlakovou ztrátou a jsou zdrojem hluku. I přesto, že jsou jednodušší na výrobu se moc nepoužívají. Do kolen se vkládají vodící plechy z důvodu usměrnění proudu vzduchu. Toto není vhodné pro větve na sání ventilátorů, kde je nebezpečí ucpání kolena papírem, vlákna a různých látek. Při poměru stran $B/A \geq 3$ a při $A \leq 180\text{mm}$ je nutné místo kolena použít oblouku.



Obr. 15 Tvarovky vzduchovodů pro rozvod

1-oblouk, 2-oblouk pro kruhové potrubí většího průměru, 3-ostře koleno, 4-přechodové koleno, 5,6-odbočky, 7,8,9-rozbočky, 10-odskok s přechodem, 11-přechod čtyřhranného průřezu na kruhový, 12-přechod, 13-rozbočka 90°, 14-odbočka 90°, 15-odbočka 45°, 16-oblouk, 17-rozbočka 2x45°, 18-rozbočka s obloukem.

Difuzory pro malou tlakovou ztrátu nesmí mít úhel stěn větší než 14°. Krátké difuzory, u kterých dochází k velkým změnám průřezu, je vhodné rozšířit stěny s malým úhlem a ukončit je náhlým rozšířením.

K připojení koncových jednotek, stropních vyústek a zákrytů místě odsávaných strojů se používají pružné roury. Jsou svinuty z jedné až tří vrstev tenkého hliníkového pásku.

3 PROUDĚNÍ PLYNŮ

3.1 Zákony pohybu vzduchu

Řešíme-li úlohu proudění tekutin vycházíme z diferenciální nebo integrální formy zákona o zachování hmoty a druhého Newtonova pohybového zákona popřípadě zákona o zachování energie.

- Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity v kartézských souřadnicích platí pro vzduch jako viskózní i neviskózní nestlačitelnou tekutinu:

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

x, y, z – složky vnějšího zrychlení [m/s^2]

Při průtoku vzduchovody nedochází ke změně hmotnostního průtoku vzduchu:

$$\dot{m} = \rho \cdot w \cdot r = \text{konst} \quad (14)$$

\dot{m} - hmotnostní průtok [$\text{kg}/(\text{s m}^2)$]

w – rychlost průtoku vzduchu [m/s]

ρ - hustota vzduchu [kg/m^3]

r – průřez [m^2]

- Pohybová rovnice

Vnější síly udělují proudícímu vzduchu zrychlení, při zanedbání viskozity vzduchu vyjadřuje Eulerova pohybová rovnice.

$$\frac{Dw}{Dt} = R - \frac{1}{\rho} \text{grad}p = R - \frac{1}{\rho} \nabla p \quad (15)$$

R – tepelný odpor [$\text{m}^2\text{K/W}$]

w – rychlost průtoku vzduchu [m/s]

ρ - hustota vzduchu [kg/m^3]

Vnější zrychlení je gravitační $R = -gj$, odstředivé $R = \omega^2 r$ nebo Coriolisovo $R = 2\omega \times w$.

g – tíhové zrychlení [m/s^2]

ω - úhlová rychlost [$1/\text{s}$]

r – poloměr [m]

x- vzdálenost [m]

Navierova –Stokesova rovnice pro viskózní kapalinu, která platí pro laminární proudění

$$\frac{Dw}{Dt} = R - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 w \quad (16)$$

ν - kinematická viskozita [m^2/s]

pro turbulentní proudění

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (17)$$

x,y,z – složky vnějšího zrychlení [m/s^2]

- Energetická rovnice

Energie proudícího vzduchu je vyjádřena Bernoulliho rovnicí tedy součtem polohového, dynamického a statického tlaku. Součet je v průřezu 2 zmenšen o tlakové ztráty, ke kterým došlo mezi průřezy 1 a 2.

$$g\rho y_1 + \frac{\rho w_1^2}{2} + p_1 = g\rho y_2 + \frac{\rho w_2^2}{2} + p_2 + \Delta p_{1,2} \quad (18)$$

g – tíhové zrychlení [m/s^2]

ρ - hustota vzduchu [kg/m^3]

y- vzdálenost [m]

w – rychlost průtoku vzduchu [m/s]

p_1 – tlak průřezu 1 [Pa]

p_2 – tlak průřezu 2 [Pa]

$\Delta p_{1,2}$ - tlaková ztráty mezi průřezy 1,2 [Pa]

3.2 Proudění vzduchu v potrubí

Budeme pokládat vzduch za viskózní tekutinu. Při proudění takovéto tekutiny potrubím nastává zpomalování vrstev bližších středu potrubí o krajní vrstvy působením viskozity tekutiny. Tento jev je důsledkem vzniku tlakových ztrát při proudění, kde tlak tekutiny se postupně snižuje. Dalším důsledkem je, že rychlost v průřezu není konstantní, změna nastává od nulové rychlosti při stěně až po maximální hodnotu v ose průřezu.

Proudění v potrubí může mít laminární charakter, kde jeho rychlostní profil má tvar paraboly a je vyjádřeno:

$$w = \frac{R}{4 \cdot \eta} \cdot (r^2 - y^2) \quad (19)$$

w – rychlost průtoku vzduchu [m/s]

R – měrná tlaková ztráta [Pa/m]

η - dynamická viskozita [Pa/s]

r – průřez [m]

y – poloha v průřezu [m]

Nebo turbulentní, jeho rychlostní profil má plošší tvar a jeho vyjádření:

$$w = w_M \cdot \left(1 - \frac{y}{r}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (20)$$

w - rychlost proudění ve vzdálenosti y [m/s]

w_M - rychlost v ose, kde exponent n roste s Re [m/s]

r – poloměr kruhové trubice [m]

n – exponent závisí na Reynoldsově čísle uvedené v tabulce [-]

y – vzdálenost [m]

Druh proudění charakterizuje Reynoldsovo číslo Re:

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad (21)$$

Re – Reynoldsovo číslo [-]

d - rozměr průřezu [m]

ν - kinematická viskozita [m²/s]

Tab. 8 Závislost exponentu n na Re

Re	n	w	Povrch
≤ 2320	6	0,791	drsny
45000	7	0,817	hladký
200000	8	0,837	hladký
640000	9	0,583	hladký
2000000	10	0,866	hladký

Jestliže je hodnota Re menší než je jeho kritická hodnota 2320, nastává vždy laminární proudění. V rozsahu Re od kritické hodnoty do 10 000 mluvíme o přechodové oblasti proudění mezi laminárním a turbulentním prouděním. Vyšší hodnota Re než 10 000 vždy popisuje proudění turbulentní

Díky tření vždy vznikají tlakové ztráty, přetlak vzduchu se snižuje. Samotná velikost tlakové ztráty závisí na materiálu potrubí na drsnosti jeho povrchu, rozměru potrubí, rychlosti proudění a jeho druhu. Kde větší potrubí vykazuje menší ztráty, u proudění větší rychlost znamená větší ztrátu tlaku a druh ovlivňuje výpočet součinitele tření.

- rovnice kontinuity

Pro proudění tekutin a vzdušín, kde žádná hmota se z potrubí nemůže nekontrolovatelně ztratit ani objevit.

$$\rho_1 \cdot w_{s1} \cdot S_1 = \rho_2 \cdot w_{s2} \cdot S_2 \quad (22)$$

ρ - hustota vzduchu [kg/m^3]

w – rychlost průtoku vzduchu [m/s]

S – plocha průřezu [m^2]

- Bernoulliova rovnice

Popisuje tlakové poměry v potrubí při proudění. Ani žádná energie se z potrubí nemůže ztratit ani objevit.

$$p_{s1} + p_{d1} + p_{g1} = p_{s2} + p_{d2} + p_{g2} + \Delta p \quad (23)$$

p_s - statický tlak tekutiny [Pa]

p_d - dynamický tlak tekutiny [Pa]

p_g - hydrostatický tlak tekutiny [Pa]

Δp - tlaková ztráta mezi průřezy [Pa]

3.3 Základní vztahy pro výpočet tlakových ztrát

Uvedené vztahy jsou platné pro kruhové potrubí a je upřesněn tvar průřezu. Dle Bernoulliho rovnice plyne, že celkový tlak tekutiny je konstantní. Celkový tlak rozdělíme na statický, dynamický a hydrostatický tlak.

Dynamický tlak -

$$p_d = \frac{1}{2} \rho \cdot w^2 \quad (24)$$

p_d - dynamický tlak tekutiny [Pa]

ρ - měrná hustota tekutiny [kg/m^3]

w - rychlost proudění tekutiny [m/s]

Hydrostatický tlak –

$$p_g = h \cdot \rho \cdot g \quad (25)$$

p_g - hydrostatický tlak tekutiny [Pa]

h - výška průřezu vůči srovnávací rovině [m]

ρ - měrná hustota tekutiny [kg/m³]

g - gravitační zrychlení Země [m/s²]

Tento tlak pro další výpočet zanedbáme.

Ideální kapaliny mají celkové tlaky mezi sledovaným průřezem shodné, naproti tomu u reálných kapalin dochází vlivem tření kapaliny k tlakovým rozdílům. To se projeví poklesem celkového tlaku v cílovém místě. Tento rozdíl značíme jako tlakovou ztrátu a pro návrh potrubí musíme znát jeho velikost.

- Tlaková ztráta třením – p_{zt}

$$p_{zt} = \lambda \cdot \frac{r}{4S} \cdot l \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot p_d \quad (26)$$

p_{zt} - tlaková ztráta třením [Pa]

λ - součinitel tření [-]

r – obvod průřezu potrubím [m]

S – plocha průřezu [m²]

l – délka řešeného úseku potrubí [m]

ρ - měrná hustota tekutiny [kg/m³]

w – rychlost průtoku vzduchu [m/s]

d – charakteristický rozměr průřezu [m]

p_d - dynamický tlak tekutiny [Pa]

Pro tlakovou ztrátu třením je rozhodující charakter proudění, materiál ze kterého je potrubí vyrobeno. Pokud proudění bude mít laminární charakter, nebude mít drsnost potrubí na tlakovou ztrátu žádný vliv a výpočet provedeme dle vzorce:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (27)$$

λ - součinitel tření [-]

Re – Reynoldsovo číslo [-]

U turbulentního proudění posuzujeme, zda se potrubí bude chovat jako hydraulicky hladké nebo drsné. O hladkosti potrubí se rozhodne dle vztahu:

$$\frac{k}{d} \leq \frac{30}{\text{Re}^{0,875}} \quad (28)$$

k – drsnost stěn potrubí [m]

d – charakteristický rozměr průřezu [m]

Je-li podmínka v vzorci splněna bude se potrubí chovat jako hydraulicky hladké. Součinitel λ se vypočítá:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log(\text{Re} \cdot \sqrt{\lambda}) - 0,8 \quad (29)$$

λ - součinitel tření [-]

Re – Reynoldsovo číslo [-]

Pokud vyjde že potrubí je drsné, musíme při stanovení součinitele λ rozlišit přechodovou oblast dle vzorce:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log\left(\frac{2,51}{\text{Re} \cdot \sqrt{\lambda}}\right) + \frac{k}{3,72d} \quad (30)$$

λ - součinitel tření [-]

Re – Reynoldsovo číslo [-]

k – drsnost stěn potrubí [m]

d – charakteristický rozměr průřezu [m]

Pro potrubí s hydraulicky drsným potrubím dle:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,14 - 2 \log\left(\frac{k}{d}\right) \quad (31)$$

λ - součinitel tření [-]

k – drsnost stěn potrubí [m]

d – charakteristický rozměr průřezu [m]

Tab. 9 Hodnoty drsnosti stěn potrubí

Materiál	Druh potrubí	Drsnost k [mm]
----------	--------------	----------------

tažené trubky měděné, skleněné a z plastů	technicky hladké	0,00135 až 0,00152
	hladké	0,00162
bezešvé ocelové trubky	obchodní jakost	0,05 až 0,1
	uvnitř pozinkované	0,15
	uvnitř bitumenový povlak	0,004 až 0,04
	po delší době provozu	0,5 až 0,1
potrubí z ocelového plechu	válcovaný plech	0,04 až 0,1
	uvnitř bitumenový povlak	0,01 až 0,05
	galvanizované	0,008
	po delší době provozu	1 až 2
betonové kanály	hlazené	0,3 až 0,8
	drsňé	1 až 3
	železobetonové hlazené	0,1 až 0,15
	železobetonové drsné	0,2 až 0,8

- Místní odpory – p_{zm}

$$p_{zm} = \xi \cdot p_d = \xi \cdot \rho \frac{w^2}{2} \quad (32)$$

p_{zm} - tlaková ztráta místními odpory [Pa]

ξ - součinitel vřazeného odporu [-]

p_d - dynamický tlak tekutiny [Pa]

ρ - měrná hustota tekutiny [kg/m^3]

w – rychlost průtoku vzduchu [m/s]

U místních odporů ztráta závisí na tvaru a konstrukci. Přesné vztahy jsou pro běžné výpočty příliš pracné proto se běžně nahrazují tabelovanými koeficienty.

4 VLV KONSTRUKČNÍCH PRVKŮ NA PROUDĚNÍ

4.1 Změna směru

Při změně směru proudění dochází k místní tlakové ztrátě, která závisí na tvaru samotného dílu. Ke změně směru v potrubí je možné použít různých tvarovek, jako oblouky a kolena čtvercového nebo kruhového průřezu, kde jedním z parametrů pro volbu tvaru je místní tlaková ztráta.

Výpočet tlakových ztrát lze provést různými způsoby, kde jednou z možností je použít následující vzorec:

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho \quad (32)$$

Δp - tlaková ztráta [Pa]

ρ - hustotu [kg/m^3]

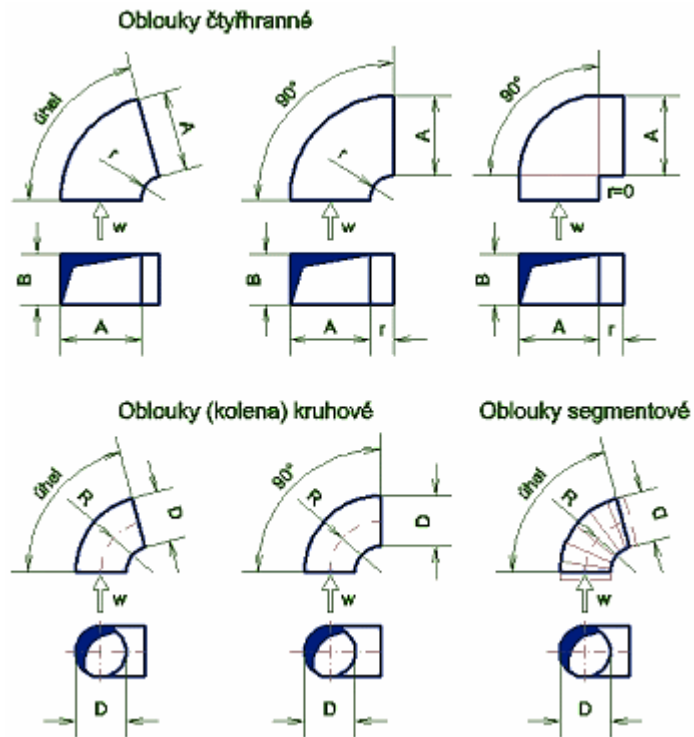
w - rychlost proudění [m/s]

ξ - součinitel vřazeného odporu [-]

4.1.1 Oblouk kruhového nebo čtvercového průřezu

Úhel , kde přípustný rozsah pro oblouky kruhového i čtvercového průřezu je 5-180°

Vyrábí se jako kruhový oblouk, čtyřhranný oblouk a segmentový oblouk. Segmentový oblouk je složen z několika segmentů a pro výpočet je potřeba znát stejné parametry jako u kruhového oblouku.



Obr. 16 Obloukové tvarovky – kruhové, čtyřhranné, segmentové

D – průměr kruhového profilu [mm]

R – poloměr zaoblení osy [mm]

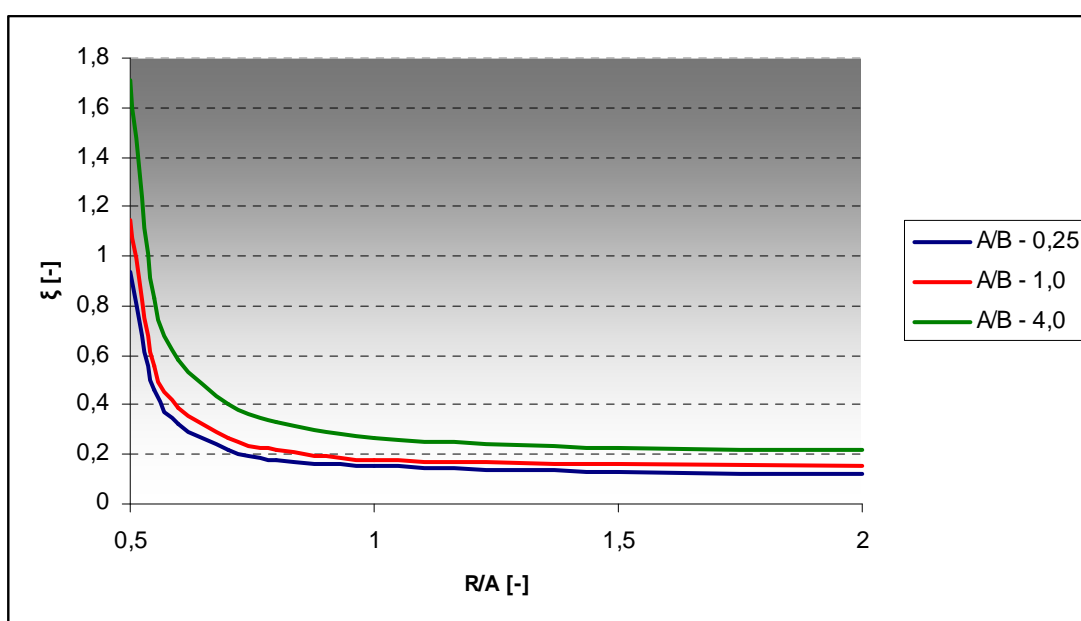
A, B – rozměr čtyřhranného profilu [mm]

r - Poloměr vnitřního oblouku [mm]

Následující tabulka a graf demonstruje závislost součinitele místní tlakové ztráty čtyřhranných oblouků s úhlem 90° bez náběhových plechů v závislosti na poměru stran profilu a poměru poloměru zaoblení osy ke straně oblouku.

Tab. 10 Součinitele místního odporu pro čtyřhranné oblouky 90°

		Poměr poloměru zaoblení k rozměru strany oblouky R/A [-]							
		ξ [-]	0,5	0,55	0,6	0,7	0,8	1	1,5
Poměr stran čtyřhranného profilu A/B	0,25	0,94	0,46	0,32	0,22	0,18	0,15	0,13	0,12
	0,33	0,96	0,46	0,32	0,22	0,18	0,15	0,13	0,12
	0,5	1	0,48	0,34	0,23	0,19	0,16	0,14	0,13
	1	1,15	0,56	0,39	0,27	0,22	0,18	0,16	0,15
	2	1,4	0,68	0,47	0,33	0,27	0,22	0,19	0,18
	3	1,58	0,76	0,53	0,37	0,3	0,25	0,21	0,2
	4	1,71	0,83	0,58	0,4	0,33	0,27	0,23	0,22



Obr. 17 Závislost součinitele místního odporu pro čtyřhranné oblouky 90°

Z grafu je vidět, že kdy použijeme oblouk se součinitel místní tlakové ztráty pohybuje okolo 0,1 až 0,3. Jestliže se vnitřní zaoblení začne zmenšovat, dojde k odtržení proudu a tlakové ztráty se začnou zvyšovat.

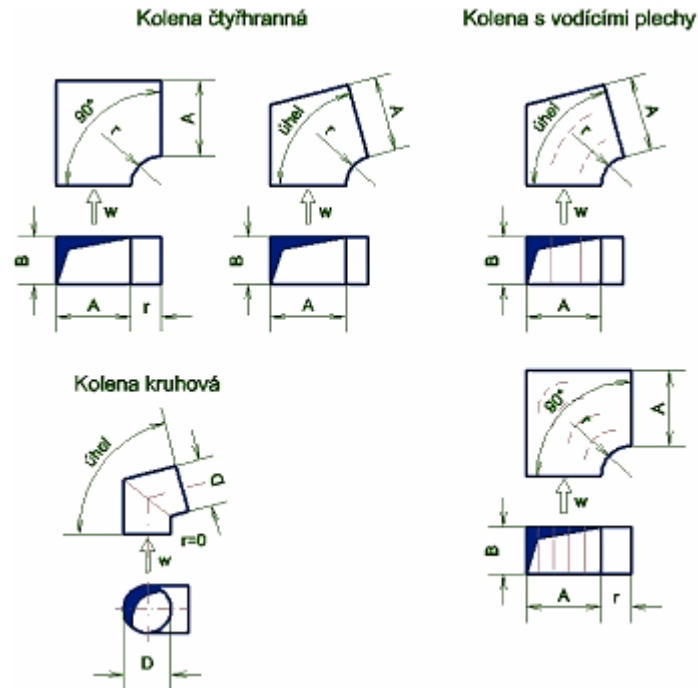
4.1.2 Koleno ostré kruhového nebo čtvercového průřezu

úhel kolena je přípustný v rozsahu 5-90°

Jsou vyráběny v provedení kruhové koleno, čtyřhranné kolno a koleno s vodícími plechy.

Kde koleno s vodícími plechy je zvláštní případ čtyřhranného kolena.

Všechny případy demonstruje následující obrázek.



Obr. 18 Tvarovky kolena – kruhová, čtyřhranná s vodícími plechy

D – průměr kruhového profilu [mm]

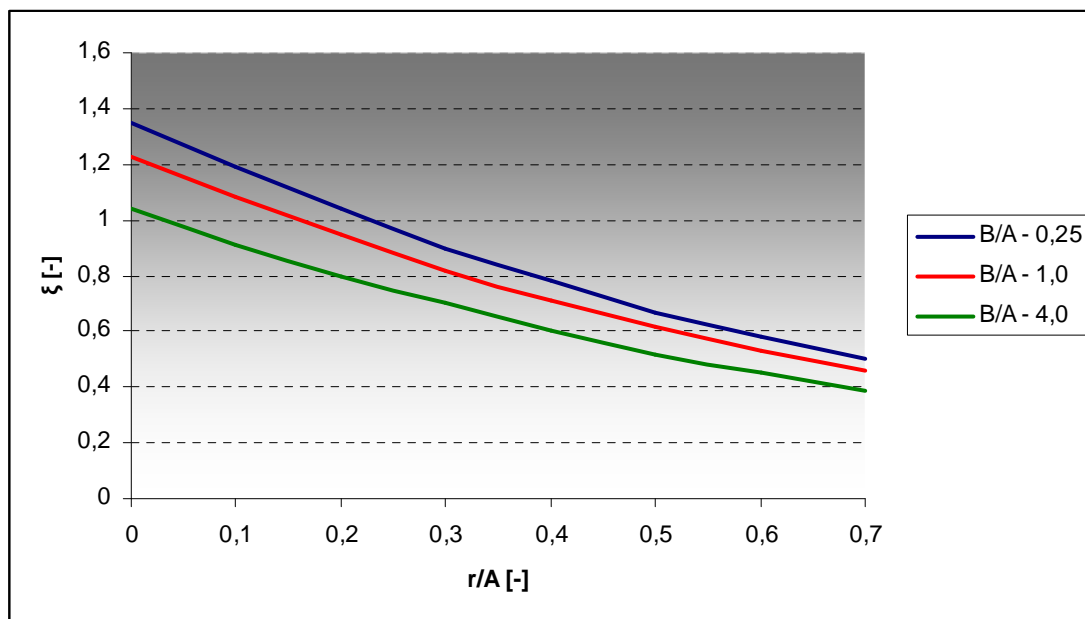
r – poloměr vnitřního oblouku [mm]

A, B – rozměr čtyřhranného profilu [mm]

Tabulka a graf ukazují závislost součinitele místní tlakové ztráty čtyřhranných kolen s úhlem 90° bez náběhových plechů v závislosti na poměru stran profilu a poměru poloměru zaoblení vnitřního oblouku ke straně oblouku.

Tab. 11 Součinitel místního odporu pro kolena 90°

		Poměr poloměru zaoblení k rozměru strany kolena r/A [-]								
		ξ [-]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Poměr stran čtyřhranného profilu B/A	0,25	1,35	1,19	1,04	0,9	0,78	0,67	0,58	0,5	
	0,33	1,33	1,17	1,02	0,89	0,77	0,67	0,58	0,5	
	0,5	1,3	1,14	1	0,87	0,75	0,65	0,56	0,49	
	1	1,23	1,08	0,95	0,82	0,71	0,62	0,53	0,46	
	2	1,14	1	0,88	0,76	0,66	0,57	0,49	0,43	
	3	1,08	0,95	0,83	0,72	0,63	0,54	0,47	0,41	
	4	1,04	0,91	0,8	0,7	0,6	0,52	0,45	0,39	



Obr. 19 Závislost součinitele místního odporu pro kolena 90°

Z grafu je vidět, že oproti obloukům se zaoblenou vnější stranou je tlaková ztráta vyšší i v případech kdy je vnitřní oblouk dostatečně zaoblen. To způsobuje víření v rohu kolene.

4.1.3 Výpočet tlakových ztrát tvarovek- změna směru

Pro porovnání různých typů tvarovek jsem pro výpočet uvažoval charakteristický rozměr 500 mm, úhel tvarovky 90°, průtokovou rychlost 6m/s, hustotu 1,2kg/m³. Výsledky vidíme v následující tabulce:

Tab. 12 Hodnoty tlakové ztráty tvarovek - změna směru

	Typ tvarovky	Průtok [m ³ /h]	Tlaková ztráta [Pa]	Poměr [%]
1	Hladký oblouk kruhový R=1/2D	4241	25,7	100
2	Hladký oblouk kruhový R=1D	4241	4,1	16
3	Hladký oblouk kruhový R=2D	4241	3,3	13
4	Segmentový oblouk kruhový R=1D	4241	5,5	21
5	oblouk 500 x 500 r = 0mm	5400	24,9	97
6	oblouk 500 x 500 r = 100mm	5400	5,8	23
7	oblouk 640 x 400 r = 100mm	5443	7,4	29
8	oblouk 400 x 640 r = 100mm	5443	4,7	18
9	oblouk 500 x 500 r = 200mm	5400	4,3	17
10	koleno 500 x 500 r = 200mm	5400	15,4	60
11	koleno 500 x 500 r = 200mm s náběhy	5400	5,9	23
12	koleno 500 x 500 r = 0mm	5400	26,6	104
13	koleno 500 x 500 r = 0mm s náběhy	5400	10,1	39

Z uvedené tabulky je zřejmé, že nejvyšší tlakovou ztrátu mají oblouky a kolena s malým nebo žádným vnitřním zaoblením. (1, 5, 12) Pokud použijeme zaoblení, tlaková ztráta klesá, ale od určitého poměru zaoblení je další pokles poměrně malý (2, 3). Při malých rychlostech proudění je vhodné použít kruhové tvarovky s poloměrem $1 \times D$ (2), protože zvětšováním poloměru se tlakové ztráty významně nesnižují. Použitím segmentových oblouků (4) u vyšších průtokových rychlostí nabývají tlakové ztráty vyšších hodnot, proto je vhodné použít tvarovky s poloměrem zaoblení 1,5 až 3 x D.

Vložením naváděcích plechů (11, 12, 13) zmenšíme rozměr tvarovky, to znamená malý poloměr zaoblení. Pokud budou naváděcí plechy nevhodně tvarované, mohou zvýšit tlakovou ztrátu.

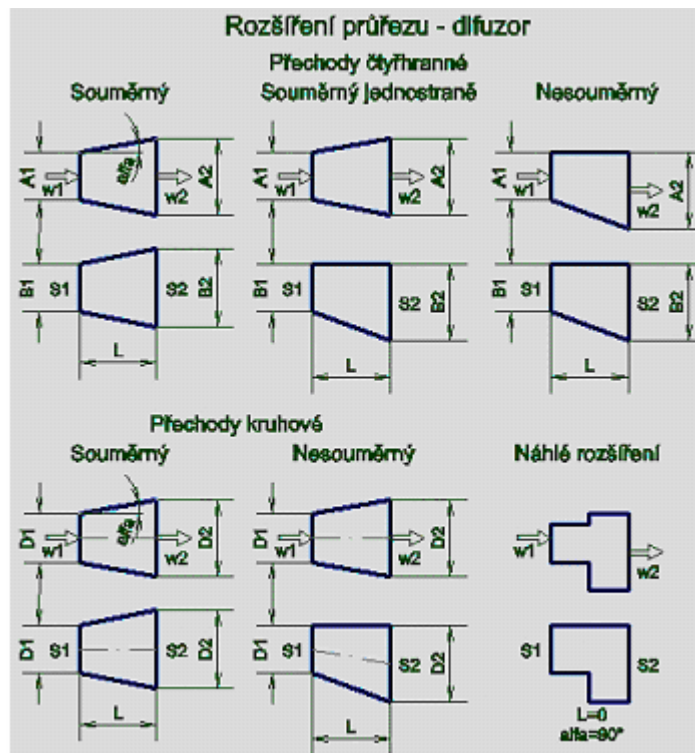
4.2 Změna průřezu

Tyto prvky jsou označovány jako přechodové. Rozlišujeme dva základní případy a to zmenšení nebo zvětšení profilu.

Pro výpočet tlakové ztráty je nutné znát základní údaj o tvaru přechodu jako vstupní a výstupní profil a délku.

Opět je volen kruhový nebo čtyřhranný průřez.

4.2.1 Difuzor - rozšíření průřezu



Obr. 20 Tvarovky pro rozšíření průřezu – difuzor

S – plocha [m²]

α - úhel rozšíření [°]

L - délka přechodu tvarovky [mm]

A,B – rozměry čtyřhranného profilu [mm]

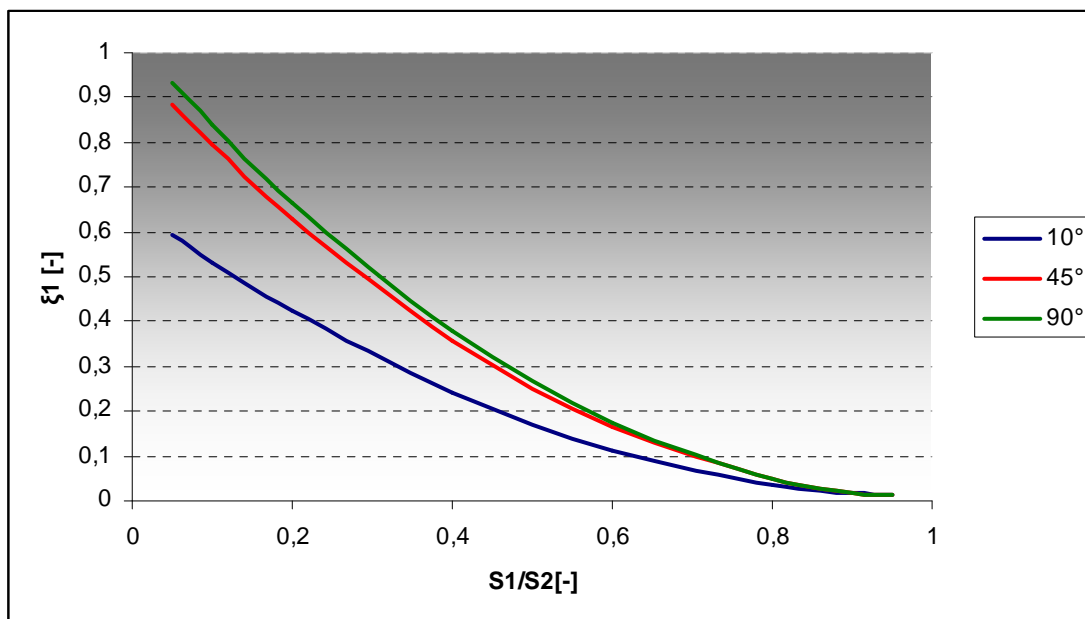
D- průměr kruhového profilu [mm]

w- rychlost proudění [m/s]

1, 2 – index vztažený ke vstupu, výstupu.

Tab. 13 Součinitel místního odporu pro difuzor- souměrný přechod

		Poměr plochy výstupu a vstupu S1/S2 [-]							
		ξ_1 [-]	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9
úhel rozšíření alfa [°]	5	0,342	0,308	0,245	0,142	0,069	0,025	0,014	0,011
	10	0,593	0,533	0,423	0,243	0,113	0,036	0,016	0,012
	15	0,706	0,634	0,503	0,287	0,133	0,041	0,018	0,012
	30	0,836	0,751	0,595	0,339	0,156	0,047	0,019	0,012
	45	0,883	0,794	0,629	0,358	0,165	0,049	0,02	0,012
	60	0,908	0,816	0,647	0,368	0,169	0,05	0,02	0,012
	90	0,933	0,838	0,664	0,378	0,174	0,051	0,02	0,013



Obr. 21 Závislost součinitele místního odporu pro difuzor- souměrný přechod

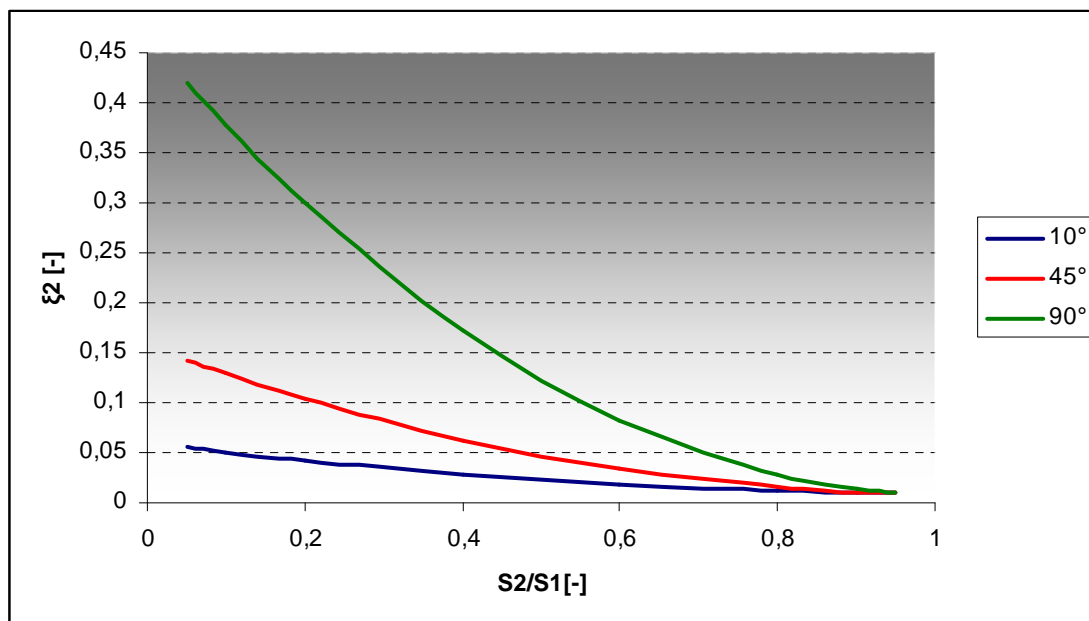
Uvedený graf představuje závislost součinitele místní tlakové ztráty na poměru ploch a úhlu rozšíření přechodu. Je vidět, že hodnota součinitele závisí na poměru ploch. Vliv úhlu je také velký, pokud se však přesáhne hodnota okolo 20°, dochází k odtrhávání proudů a vzniku vírů. Následkem jsou vysoké tlakové ztráty.

4.2.2 Konfuzor – zúžení průřezu

Tvarovky jsou shodné, pouze je otočený směr proudění. Z čeho plyne, že index 1 se vztahuje k většímu průřezu a index 2 k menšímu průřezu. Viz předchozí obr.

Tab. 14 Součinitel místního odporu pro konfuzor - souměrný přechod

		Poměr plochy výstupu a vstupu S2/S1 [-]							
		ξ2 [-]	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9
úhel rozšíření alfa [°]	5	0,052	0,048	0,04	0,027	0,018	0,012	0,01	0,01
	10	0,056	0,051	0,043	0,028	0,018	0,012	0,011	0,01
	15	0,062	0,056	0,047	0,031	0,019	0,012	0,011	0,01
	30	0,092	0,084	0,068	0,043	0,025	0,014	0,011	0,01
	45	0,143	0,13	0,105	0,063	0,034	0,016	0,011	0,01
	60	0,215	0,194	0,155	0,092	0,046	0,019	0,012	0,011
	90	0,42	0,378	0,3	0,173	0,083	0,028	0,015	0,011



Obr. 22 Závislost součinitele místního odporu pro konfuzor- souměrný přechod

V grafu je uvedena závislost součinitele místní tlakové ztráty souměrného kruhového přechodu – konfuzoru. Tento typ tvarovky vykazuje malé tlakové ztráty. Závislost na úhlu zúžení profilu je přesně opačná než u difuzoru. Tedy i při velkém úhlu je součinitel poměrně nízký a teprve při náhlém zúžení 90°, nebo při vyšším úhlu než 60° je součinitel vyšší.

4.2.3 Výpočtů tlakových ztrát přechodů

Následující tabulka demonstuje vliv změny tvaru na tlakovou ztrátu. Pro všechny případy je použit průtok vzduchu 4000 m³/h, rychlost proudění od 2 do 12 m/s s je uvažované souměrné provedení.

Tab. 15 Hodnoty tlakové ztráty tvarovek přechodů

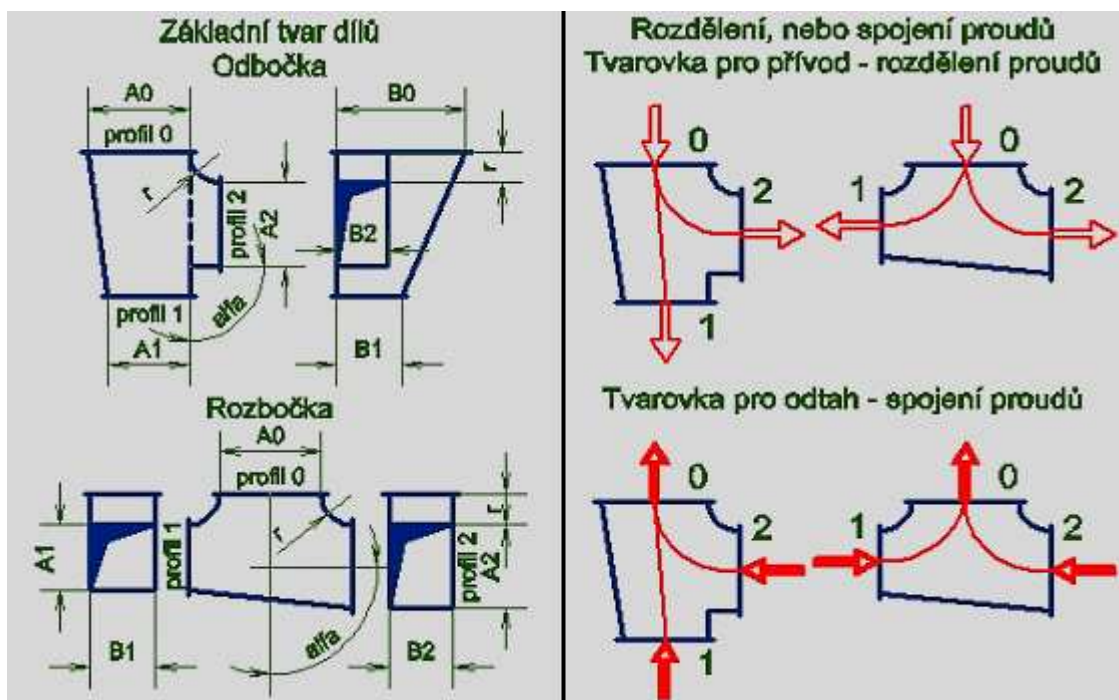
	Typ tvarovky	Tlaková ztráta [Pa]	Poměr [%]
1	500 x 315 - 400 x 630/500	5,9	100
2	500 x 315 - 400 x 630/300	6,9	117
3	500 x 315 - 400 x 630/200	7,6	129
4	500 x 315 - 630 x 800/200	19,3	327
5	500 x 315 - 630 x 800/1000	13,8	234
6	500 x 315 - 400 x 250/300	1,7	29

Z výsledků je vidět, že uvedená tlaková ztráta není příliš vysoká. Především u konfuzoru (6) je součinitel místní tlakové ztráty docela malý. U difuzoru (1, 2) je to jinak, pokud je

poměr plochy malý je tlaková ztráta nízká. Ke-li poměr plochy vysoký, dojde k odtržení proudu od stěny a tím pádem ke zvišení. Kde tlaková ztráta naroste (4).

4.3 Dělení a spojování proudů

Na rozdíl od tvarovek pro změnu směru proudění (kolena, oblouky), nebo profilu (přechody) je závislost součinitele místního odporu u rozboček a odboček poměrně komplikovaná a parametry, které ji ovlivňují jsou jednak tvarové, ale také průtokové.



Obr. 23 Tvarovky pro rozdělování a spojování proudů

5 HLUČNOST ODSÁVACÍCH JEDNOTEK

Nadměrná hlučnost je odnepaměti velkou přítěží pro člověka, může způsobit značné zdravotní potíže. Proto je hlučnost u odsávacích jednotek jedním ze sledovaných parametrů. Výsledné údaje jsou uvedeny v normách ČSN.

5.1 Základní veličiny technické akustiky

Člověk vnímá zvuk v kmitočtovém rozsahu 20Hz až 20kHz. Nepoškozený lidský sluch je schopen zaznamenat akustický signál odpovídající akustickému tlaku 20 μ Pa. Naproti tomu je lidské ucho schopné snášet akustický tlak 10⁶ krát silnější.

Hladina akustického tlaku určuje akustický stav v prostředí, je vyjádřena

$$L = 20 \log \frac{p_{ef}}{p} \quad (33)$$

L – hladina akustického tlaku [dB]

p – akustický tlak [Pa]

p_{ef} - efektivní hodnota akustického tlaku [Pa]

Hladina akustického výkonu vyjadřuje hlučnost zdroje hluku

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_o} \quad (34)$$

L_w - hladina akustického výkonu [dB]

W - akustický výkon stroje [W]

W_o - referenční akustický výkon [W]

5.2 Zdroje hluku

Hlavní příčiny vzniku hluku ve vzduchotechnických zařízeních jsou

- Aerodynamická činnost u ventilátorů jako obtékání lopatek, úplavy, turbulence.
- Mechanická činnost u ventilátorů například nevyváženost rotujících částí, hluk valivých ložisek, převodů, spojky, elektromotoru.
- Hluk pomocných zařízení jako jsou oběhová čerpadla, chladicí kompresory.
- Aerodynamický hluk vznikající v rozvodném potrubí, tlumičích hluku a koncových zařízeních jako vyústky, regulační klapky.

Výrobce musí poskytovat u zařízení následující akustické informace, které musí odpovídat příslušné normě ISO i ČSN.

- Hladinu akustického výkonu $L_{WA}(dB(A))$
- Hladinu akustického výkonu v oktávových popřípadě třetinových oktávových pásmech $L_{Woct}(dB)$
- Hladinu zvuku v prostoru obsluhy $L_A(dB(A))$
- Hladinu akustického tlaku v oktávových pásmech v prostorách předepsaných pro obsluhu $L_{oct}(dB)$

U vzduchotechnických zařízení je nejdůležitější akustický výkon, vyjádřený v oktávových pásmech. Akustický výkon je vyzařována do sacího a výtlačného potrubí a přenáší se vzduchem v potrubí nebo samotným potrubím. V některých místech je utlumen odrazem nebo vyzařován z potrubí do okolního prostoru. V místě, kde se nachází samotné zařízení je hluk vyzařován přímo do prostoru a šíří se stěnami, podlahou a stropem do okolních místností. Dále vibrace ventilátoru mohou být přenášeny do konstrukce budovy. Proto je důležité sledovat všechny možné cesty šíření hluku od zdroje až k cíli a snažit se hluk eliminovat.

5.3 Ventilátor jako zdroj hluku

U ventilátorů se projevuje aerodynamický a mechanický hluk. Spektrum aerodynamického hluku je spojitě širokopásmové, kde kmitočet je vyjádřen vztahem:

$$f = n \cdot z \quad (35)$$

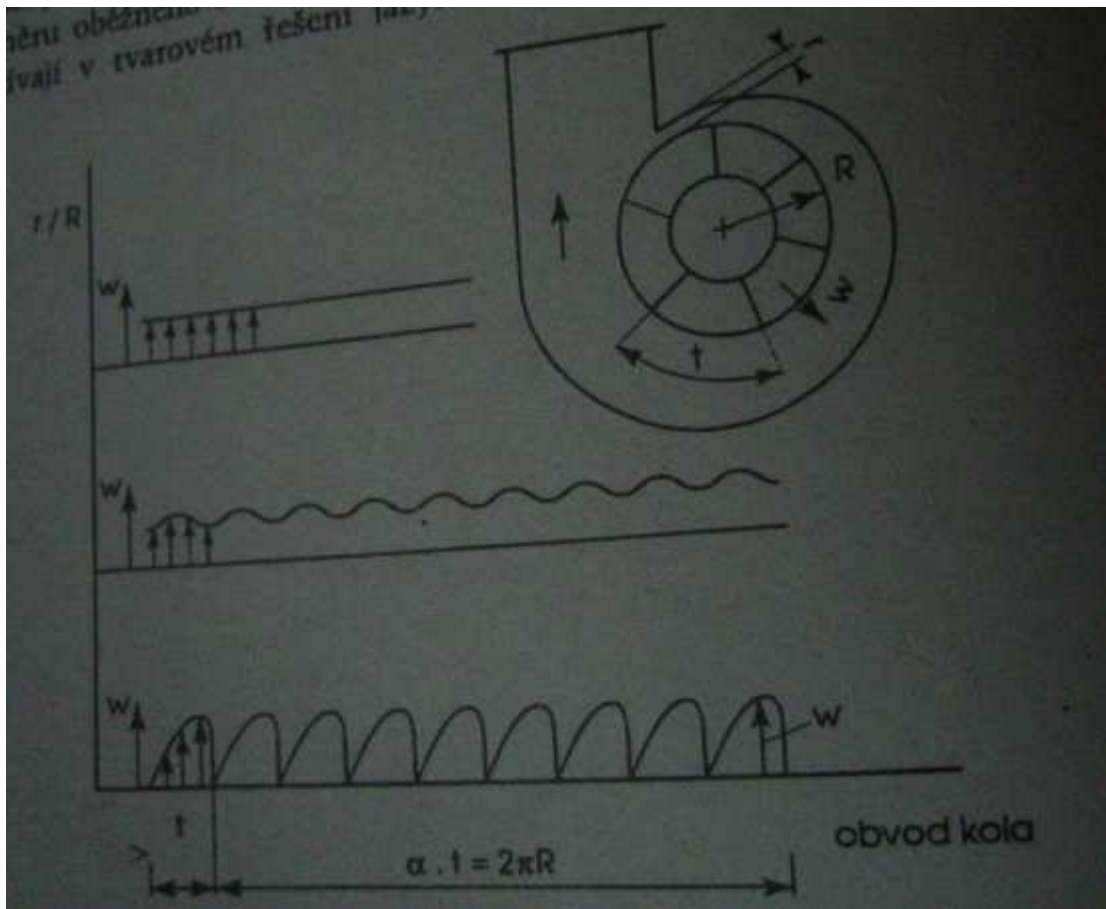
f – kmitočet [Hz]

z – počet lopatek oběžného kola [-]

n - otáčky stroje [-]

V tomto spektru se objevuje sirénový hluk, za jeho vznikem je považován nerovnoměrný rotující rychlostní profil proudu vzduchu na obvodu oběžného kola. Se zvětšující se vzdáleností od oběžného kola dochází k postupnému vyrovnání rychlostního profilu. Pulzy, které se projeví jako akustický výkon vzniknou při styku nevyrovnaného rychlostního pole s jazykem ventilátoru.

Tento nežádoucí jev lze při výrobě ventilátorů potlačit zvětšením mezery mezi jazykem a oběžným kolem na 1/10 vnějšího průměru oběžného kola nebo jinak tvarově řešit jazyk.



Obr. 24 Vznik sirénového hluku ventilátoru

Celkový akustický výkon ventilátoru

$$L_W = L_{Wsp} + 10 \log V + (20 \text{ až } 25) \log \Delta p \quad (36)$$

L_W - akustický výkon [dB]

V - průtok vzduchu ventilátorem [m^3/s]

Δp - celkový tlak ventilátoru [Pa]

L_{Wsp} - hladina akustického výkonu [dB]

Konstanta 20 odpovídá radiálním a 25 axiálním ventilátorům

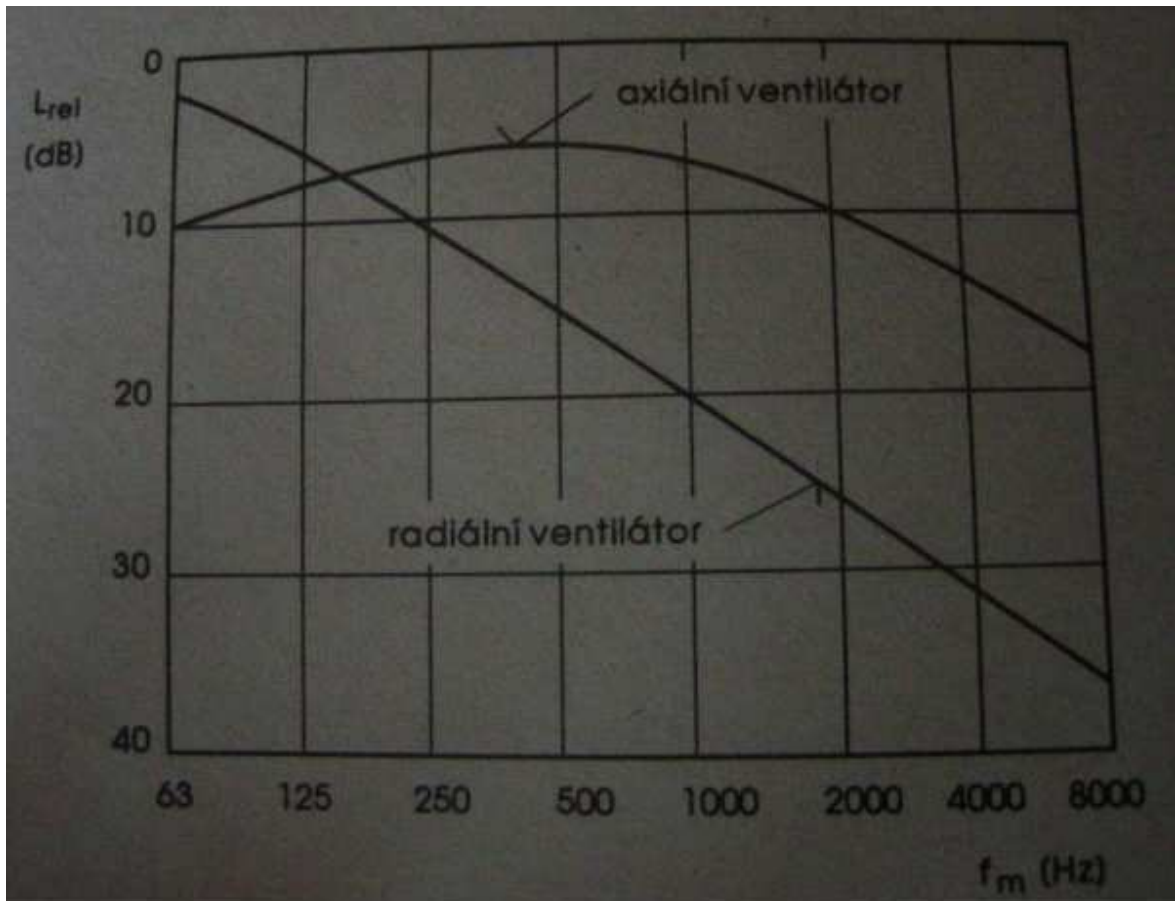
Pro praktické použití je lepší volit větší ventilátor s nižšími otáčkami, který vykazuje menší hlučnost. Výsledná hlučnost vzduchotechnického zařízení je ovlivněna tvarem spektra akustického výkonu ventilátoru. Radiální ventilátory s dopředně zahnutými lopatkami vytvářejí akustický výkon v oblasti nízkých kmitočtů. Kde u axiálních ventilátorů je akustický výkon vyzařován rovnoměrně ve všech oktávových pásmech.

Vztah pro výpočet akustického výkonu v oktávních pásmech

$$L_{W_{oct}} = L_W + L_{rel} \quad (37)$$

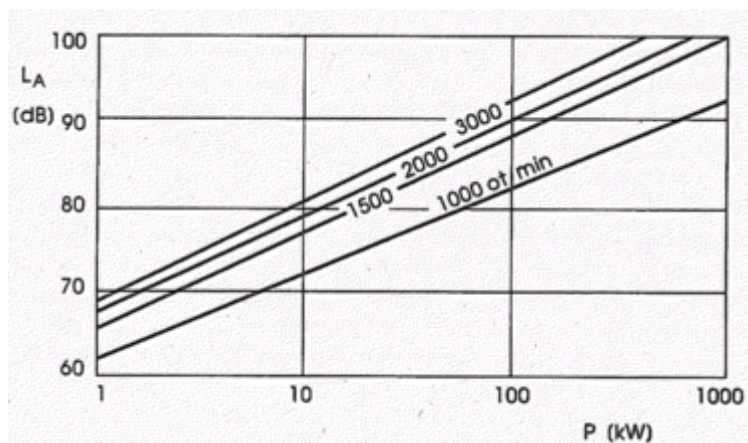
L_W - celková hladina akustického výkonu [dB]

L_{rel} - relativní hladina akustického výkonu [dB]



Obr. 25 Relativní hladiny akustického výkonu ventilátoru

Pokud je sání ventilátorů otevřené, je vyzařovaný hluk do prostoru dán akustickým výkonem podle vztahů (36) a (37). Pro situaci, kde je na sací a výtláčné straně připojeno potrubí je hlučnost v okolí ventilátoru o 15 až 20 dB nižší než celková hladina akustického výkonu vypočítaná ze vztahu (36). V tomto případě je hladina hluku L_A dána výrobcem a měří se 1 m od obrysu ventilátoru. Hluk elektromotoru může ovlivnit celkovou hladinu hluku.



Obr. 26 Hladina hluku elektromotoru ve vzdálenosti 1 m

5.4 Aerodynamický hluk v přímém potrubí

Vlastní hluk v přímém potrubí vzniká turbulentním průtokem vzduchu. Tento hluk je však zanedbatelný oproti hluku vznikajícím u ventilátoru.

Celková hladina akustického výkonu vyplývajícího z proudění v potrubí se určí ze vztahu

$$L_w = 10 + 10 \log w^5 + 10 \log S \quad (38)$$

w – rychlost proudění vzduchu [m/s]

S – průřez potrubí [m]

Spektrum hladiny akustického výkonu určíme ze vztahu (38), kde hodnotu relativní hladiny bereme z tabulky 16

Tab. 16 Relativní hladina vlastního hluku potrubí

Střední kmitočet pásma fm	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Lrel dB	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-14	-22

5.5 Hluk pravoúhlého oblouku

Protéká-li vzduch koleny, rozbočkami, klapkami dochází k náhlým změnám směru proudění. Hluk vyzařovaný z těchto míst má povahu dipólového zdroje. Celková hladina akustického výkonu pravoúhlých čtyřhranných a kruhových kolen se vyjádří vztahem:

$$L_w = 62 \log W + 10 \log S \quad (39)$$

w – rychlost proudění vzduchu

S – průřez připojovací příruby

S využitím vztahu (39) vypočítáme hladinu akustického výkonu v oktávových pásmech, kde relativní hladiny stanovíme z tabulky 17.

Tab. 17 Relativní hladiny akustického výkonu pravoúhlých obloků a kolen [dB]

Rychlost proudění W m/s	Střední kmitočet pásma fm Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
2	-3	-6	-9	-18	-25	-33
4	-4	-6	-9	-14	-20	-27
5	-4	-6	-8	-11	-16	-22
8	-5	-6	-8	-10	-13	-18
10	-4	-6	-7	-9	-11	-14

6 METODY MĚŘENÍ PARAMETRŮ ODSÁVACÍHO SYSTÉMU

Základní měřené parametry zahrnují objemový průtok m^3/min , rychlost proudění m/s nebo teplotu $^{\circ}\text{C}$

6.1 Principy měření

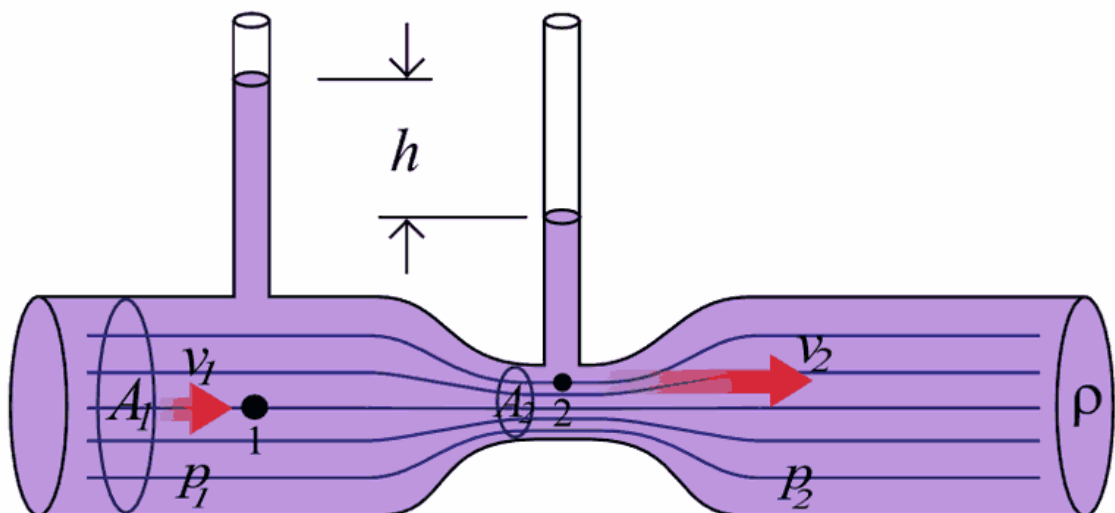
Do potrubí může být namontován stálý průtokoměr například Venturiho trubice, clona, kuželová překážka případně proudová mřížka. Každé toto uvedené zařízení je pevně nainstalováno a vytváří odpor vlivem tření.

Nebo se využívá Pradtl. případně Pitot. trubice, která je pomocí otvorů v potrubí přivedena přímo do proudícího média.

6.1.1 Venturiho trubice

Venturiho trubice využívá ke stanovení hmotnostního průtoku plynu. Tekutina je zrychlena v kuželovém konfuzoru, toto způsobí snížení statického tlaku. V další části trubice se tlak téměř vrací na úroveň tlaku před zúžením.

Zařízení je pevně namontované do potrubí a vytváří určitý odpor vlivem tření. K tomu abychom se vyhnuli ztrátě tlaku vzniklého třením, musí mít Venturiho trubice hladké vnitřní povrchy a malé úhly při protažení potrubí.



Obr. 27 Venturiho trubice

Objemová rychlost vzduchu skrz venturiho trubici je vyjádřena vztahem:

$$Q = k \cdot \pi \cdot d^2 \frac{(2 \cdot \rho \cdot \Delta p)^{0,5}}{4} \quad (40)$$

Q – proud vzduchu [m³/s]

k – koeficient pro Venturiho trubici = kolem 1 [-]

d – průměr hrdla [m]

ρ - měrná hustota tekutiny [kg/m³]

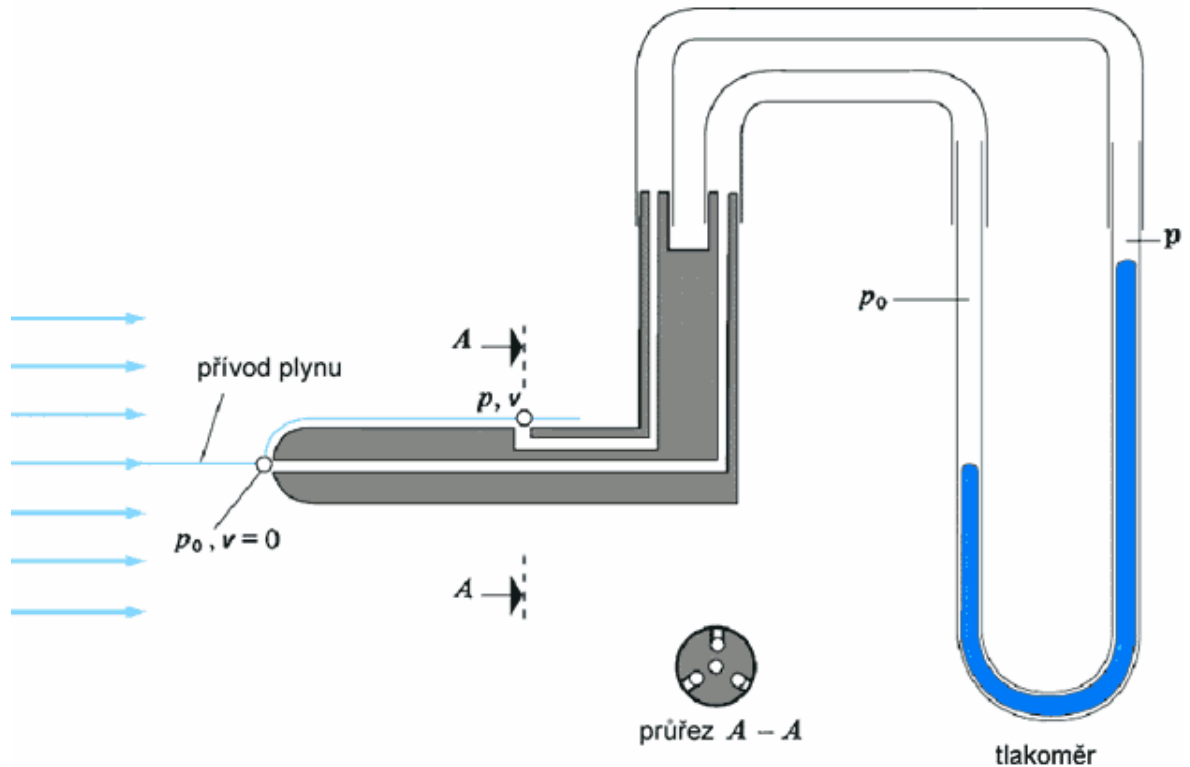
Δp - rozdíl tlaků napříč měřidlem [Pa]

Příklad pro výpočet Venturiho trubice je uveden v příloze.

6.1.2 Pitotova a Prandtlova trubice

Tenká dvouplášťová trubka obrácená ústím vnitřní trubky proti směru proudění plynu. Má ještě další otvor ve stěně vnější trubky kolmý na směr proudění plynu. Při měření se využívá celkového dynamického a statického tlaku zjišťovaného trubicí uvnitř potrubí, který je měřen pomocí diferenčního manometru. Trubice mají protáhlý elipsovité tvar a jsou vyráběny jako skládací nebo teleskopické z důvodu měření ve velkých profilech.

Pitotova trubice je jednodušší variantou Prandtlovy trubice, kde statickým tlakem pro tlakovou diferencii je atmosférický tlak okolí.



Obr. 28 Prandtlova trubice

Průměrnou rychlost ve zkušebním úseku lze stanovit z rovnice

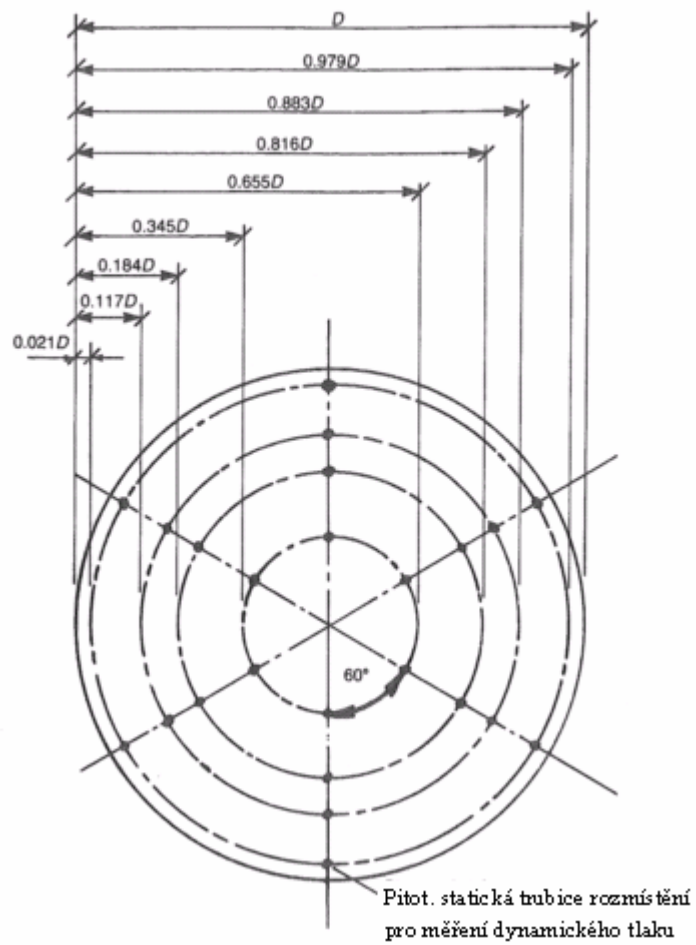
$$w = \left(\frac{2 \cdot p_d}{\rho} \right)^{0,5} \quad (41)$$

w – rychlost průtoku vzduchu [m/s]

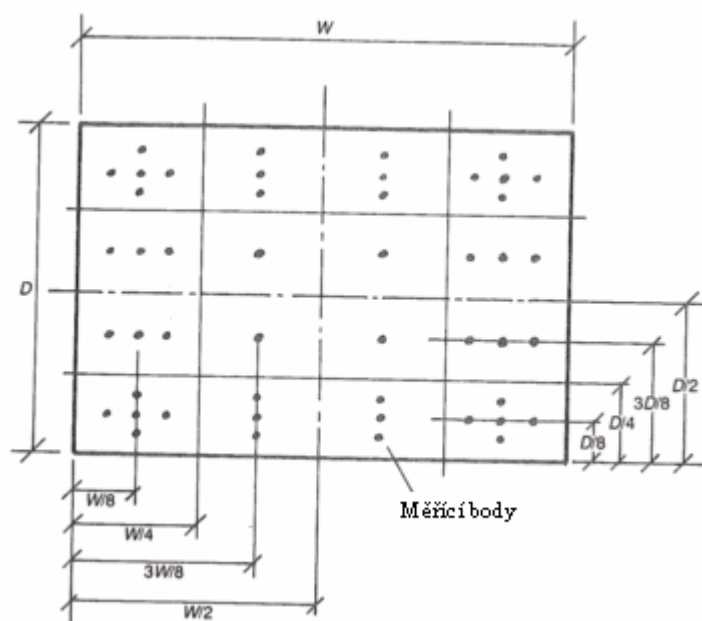
p_d - suma hodnot dynamických tlaků ze stálého vyústění [Pa]

ρ - měrná hustota tekutiny [kg/m^3]

Přední část Pitot. statické trubice byla upravena tak, aby vnější průměr nepřesáhoval 1/48 průměru dráhy letu v potrubí při rychlosti od 1m/s až do 70 m/s. Příčné křížení třemi průměry je vytvořené pro kruhové potrubí a slouží k měření dynamické rychlosti v 24 lokalitách. Pro měření průtoku může být použito celkem 48 bodů v pravoúhlém potrubí. Pozice měření jsou znázorněné na obrázku 29 a 30.



Obr. 29 Rozmístění bodů pro měření dynamického tlaku



Obr. 30 Měřicí body

Tab. 18 Délky používaných Prandtl. trubice

Jednodílná Prandtl. trubice											
Délka mm	305	305	483	795	1000	1220	1523	1830	2130	2440	2740
Průměr trubky mm	4	4	8	8	8	9,5	9,5	12,8	19,1	19,1	19,1
Průměr hlavy mm	2,3	x	x	x	x	x	x	9,5	9,5	9,5	9,5

Pro odvození dalších vzorců je potřeba nahlédnout do přiložené literatury.

Příklad pro výpočet Prandtl. a Pitot. trubice je uveden v příloze.

6.2 Používané typy anemometrů

Trh nabízí velké množství přístrojů, které se liší měřenými parametry, přesností a nejrůznějšími funkcemi. Od toho se odvíjí cena samotného přístroje.

- TA460

Měří rychlost proudění, objemový průtok, teplotu, vlhkost, teplotu rosného bodu, tlak, podtlak, přetlak, barometrický tlak, CO₂ a umí určit turbulenci proudění.

- Vysoká přesnost v celém rychlostním rozsahu
- Indikace až 5 měřených hodnot na displeji
- Speciální funkce „turbulence“ a nastavitelný K – faktor
- Speciální software LogData2
- Pojmenování jednotlivých měřících testů
- Bluetooth rozhraní
- Každá sonda obsahuje vlastní elektroniku
- Kalibrační certifikát

Cena přístroje je kolem 15 500Kč

- EXTECH 407119

- anemometr, průtokoměr a teploměr s teleskopickou sondou
- rozsah anemometru 0,2 až 20 m/s
- rozsah teploměru 0 až 50 °C
- rozsah průtokoměru 0 až 999 m³/min

- umožňuje volit jednotky ft/min, m/s, km/h, míle/h, uzly.
- duální displejs rozlišením 9 999 digitů
- funkce MIN/MAX/AVG/HOLD
- Rozhraní RS 232
- Rozměry 178x74x33mm

- HHF802

Slouží pro měření průtoku vzduchu co se týká klimatizace, topných systémů případně průtoku vzduchu v potrubí.

- LCD displej zobrazující současně rychlost a teplotu vzduchu
- Zaznamenává Min, max hodnotu s možností zpětného vyvolání
- Automatické vypnutí přístroje
- Sériové rozhraní RS 232

Přístroj je možné zakoupit za cenu okolo 6800Kč



Obr. 31 Měřicí přístroje používané v praxi

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 NÁVRH METODY MĚŘENÍ

- Volba přístroje

Samotné měření provedeme přístrojem, který umí měřit rychlost průtoku vzduchu m/s, objem vzduchu m³/min případně teplotu °C.

Přístroj musí mít tolerovanou přesnost měření.

- Průběh měření

Je potřeba pečlivě zvolit místa samotného měření, nejlépe začátek a konec potrubí případně před a za tvarovkou. Budeme vždy měřit rychlost proudění vzduchu a objem vzduchu v potrubí.

Prostudujeme manuál měřícího přístroje a naučíme se s ním pracovat. Načtneme schéma celého systému do kterého vhodně zakreslíme místa měření a rozměry (jako délku, průměr) potrubí nebo tvarovek. Vhodně nastavíme výkon odsávací jednotky, který bude během měření konstantní. Klapky u odsávacích ramen otevřeme na maximum. Orientačně změříme teplotu okolí pracoviště.

Odsávací ramena nastavíme do svislé polohy a změříme průtok a objem postupně na všech pracovištích.

Všechna odsávací ramena nastavíme do pracovní polohy, opět změříme průtok a objem.

Změříme průtok a objem na všech pracovištích u sekundárního potrubí za tvarovkou typu T.

Nakonec odpojíme primární potrubí a změříme objem a průtok přímo za odsávací jednotkou.

Měření provedeme několikrát a data zaznamenáme. Celé měření budeme opakovat po určité časovém období, nejlépe jednou za měsíc. Na konci zjistíme jaký vliv má samotné znečištění na průtokovou rychlost vzduchu a výkon ventilátoru.

- Vyhodnocení dat a závěr

Naměřená data - průtokovou rychlost vzduchu m/s a objem vzduchu m³/min vhodně zpracujeme formou tabulky.

Data statisticky vyhodnotíme, vykreslíme příslušné grafy a provedeme závěrečné shrnutí celého měření. Jak se změnila parametry v průběhu měření, vliv zanášení potrubí na rychlost a objem vzduchu.

8 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ

Praktické měření na instalovaném pracovišti jsem provedl ve firmě ELKO se sídlem v Holešově.

8.1 Cíl měření

Měření a vyhodnocení rychlosti průtoku vzduchu m/s a objemu vzduchu m^3/min pomocí anemometru na vhodně zvolených místech dle navržené metody.

8.2 Vlastnosti měřícího přístroje

Pro měření jsem použil anemometr model 407119A.

- měří rychlost průtoku vzduchu, objem vzduchu a teplotu vzduchu
- je relativně přesný i při měření nízkých hodnot průtokové rychlosti
- čtení až 20 průměrů
- pamatuje si max a min hodnotu
- automatické vypnutí
- počítačové rozhraní RS 232

8.3 Vlastnosti odsávací jednotky

Na pracovišti je instalovaná jednotka Laserex 9000 od firmy Purex.

Jednotka je kalibrována na reálné zátěže 683 mm vodního sloupce - podtlak (což je hmotnost vody sloupce, kterou je jednotka schopna vytlačit). Umožňuje odsávání zplodin až z 15 pozic.



Obr. 32 Odsávací jednotka Laserex 9000

Tab. 19 Údaje ze štítku

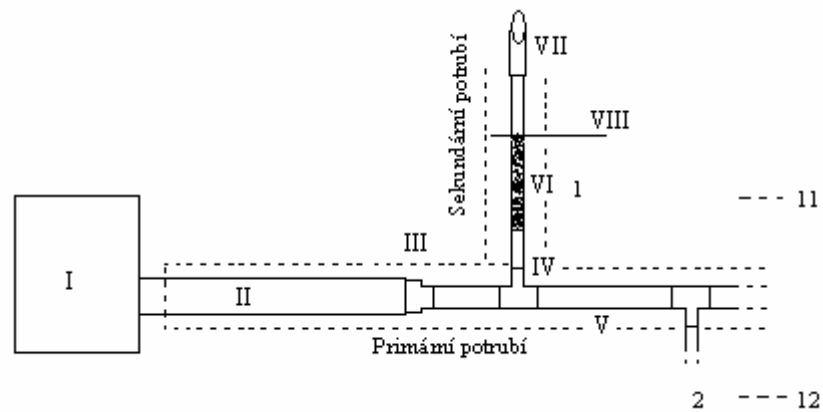
Part No.	080505D
Seriál No.	800-133
Machine	9000/6 -15A 2Tier
Motor No.	300595x2
Rated Power	2400w
Voltage	230V
Frequency	50Hz/60Hz

8.4 Popis systému

Celý systém je složen z odsávací jednotky, primárního potrubí, tvarovek typu T, sekundárního potrubí a hadic s odsávacím ramenem zakončeným náustkem.

Na odsávací jednotku je napojeno 12 pracovišť. Primární potrubí je složené z hadice, která je napojena tvarovkou typu zúžení na užší profil. Tvarovky typu T napojují užší profil primárního potrubí na sekundární potrubí k celkem 12 pracovištím.

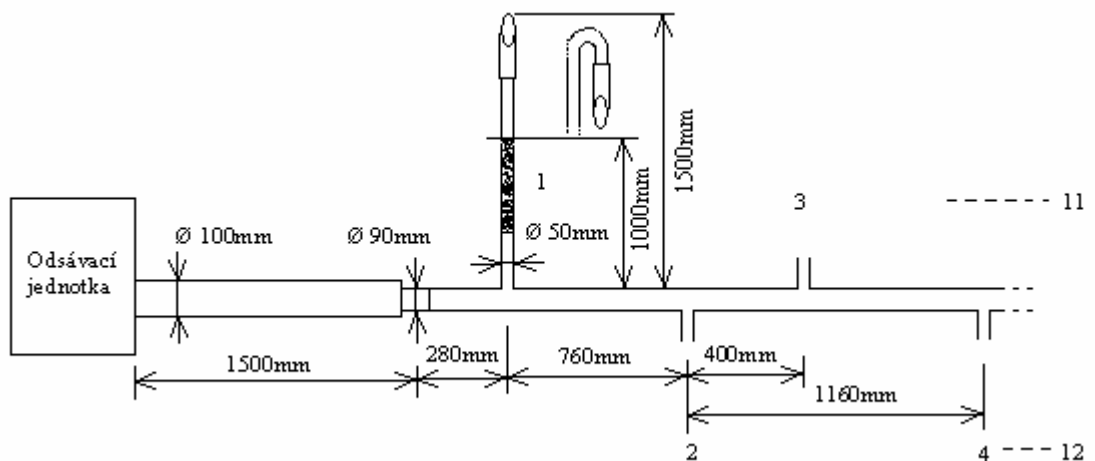
Sekundární potrubí zahrnuje hadici a nad deskou stolu odsávací rameno zakončené náustkem. Na následujícím obrázku je znázorněno napojení jednotlivých komponentů systému.



Obr. 33 Celkové složení systému

- I - odsávací jednotka
- II – hadice
- III – tvarovka typu zúžení
- IV – tvarovka typu T
- V – užší profil primárního potrubí
- VI – hadice s odsávacím ramenem
- VII – náustek
- VIII – deska pracovního stolu

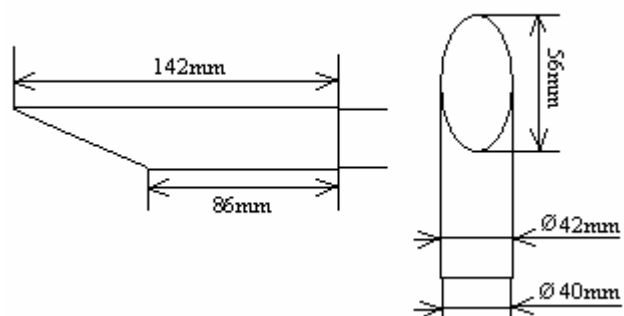
Důležité rozměry systému délky a průřezy jsou na obrázku



Obr. 34 Důležité rozměry systému



Obr. 35 Použité typy tvarovek



Obr. 36 Rozměry náustku



Obr. 37 Odsávací rameno s náustkem

8.5 Průběh měření

V průběhu celého měření byla jednotka nastavena na 300mm vodního sloupce.

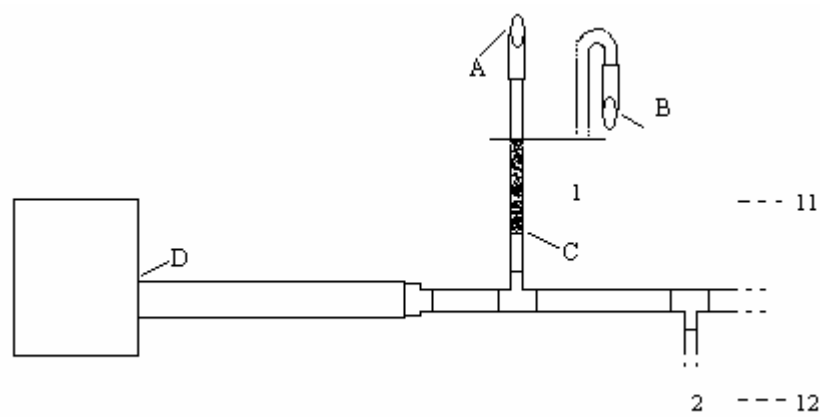
Změřil jsem teplotu okolí pracoviště 27,3°C.

Vypočítal jsem plochu míst měření, kterou je nutné zadat do měřícího přístroje. Potrubí je kruhového průřezu, plochu vypočítáme dle vzorce:

$$S = \pi \cdot r^2 \quad (42)$$

r- poloměr průřezu

Měřil jsem na vyznačených místech viz obr.33



Obr. 38 Stanovená místa měření

Místo měření A:

Výpočet plochy náustku

$$S = 3,14 \cdot 0,021^2 = 0,00126m^2$$

Odsávací ramena nastavil do svislé polohy. Sondu anemometru přiložil k náustku a změřil postupně na všech 12 pracovištích průtokovou rychlost a objemové množství vzduchu.

Tab. 20 Hodnoty rychlosti průtoku vzduchu místo A

Pracoviště	Délka potrubí [m]	Rychlost průtoku vzduchu [m/s]					Průměr	Směr. odchylka	Min.	Max.
1	1,78	21,8	23,1	23,2	22,8	23,3	22,84	0,61	21,8	23,3
2	2,54	11,8	12,4	12,5	12,3	12,9	12,38	0,40	11,8	12,9
3	2,94	18,3	18,4	18,1	18,2	18,5	18,30	0,16	18,1	18,5
4	4,10	8,0	7,8	8,1	7,9	8,0	7,96	0,11	7,8	8,1
5	4,50	12,4	12,3	12,7	12,8	12,7	12,58	0,22	12,3	12,8
6	5,66	11,2	11,4	10,7	11,1	11,5	11,18	0,31	10,7	11,5
7	6,06	12,4	12,3	11,7	11,9	12,3	12,12	0,30	11,7	12,4
8	7,22	8,0	8,1	7,9	7,7	8,2	7,98	0,19	7,7	8,2
9	7,62	9,9	9,6	9,7	8,9	9,5	9,52	0,38	8,9	9,9
10	8,78	7,3	7,2	7,5	7,2	7,6	7,36	0,18	7,2	7,6
11	9,18	9,1	9,0	9,0	8,7	8,9	8,94	0,15	8,7	9,1
12	10,34	5,8	6,1	6,0	6,1	5,8	5,96	0,15	5,8	6,1

Tab. 21 Hodnoty objemu vzduchu místo A

Pracoviště	Délka potrubí [m]	Objem vzduchu [m ³ /min]					Průměr	Směr. odchylka	Min.	Max.
1	3,28	9,689	9,676	9,681	9,714	9,735	9,70	0,02	9,676	9,735
2	4,04	5,783	5,926	5,964	5,871	5,884	5,89	0,07	5,783	5,964
3	4,44	7,358	7,677	7,660	7,673	7,690	7,61	0,14	7,358	7,690
4	5,60	3,024	2,948	2,923	2,902	2,893	2,94	0,05	2,893	3,024
5	6,00	5,678	5,636	5,615	5,611	5,628	5,63	0,03	5,611	5,678
6	7,16	4,662	4,662	4,668	4,712	4,704	4,68	0,02	4,662	4,712
7	7,56	5,178	5,208	5,128	5,086	5,191	5,16	0,05	5,086	5,208
8	8,72	3,658	3,675	3,666	3,649	3,662	3,66	0,01	3,649	3,675
9	9,12	4,229	4,195	4,237	4,254	4,211	4,23	0,02	4,195	4,254
10	10,28	3,028	3,045	3,052	3,049	3,040	3,04	0,01	3,028	3,052
11	10,68	3,725	3,792	3,826	3,851	3,828	3,80	0,05	3,725	3,851
12	11,84	2,410	2,385	2,381	2,420	2,419	2,40	0,02	2,381	2,420

Místo měření B:

Plocha náustku je stejná

Odsávací ramena nastavil do pracovní polohy a opět změřil na všech 12 pracovištích objemové množství a rychlost průtoku vzduchu.

Tab. 22 Hodnoty rychlosti průtoku vzduchu místo B

Pracoviště	Délka potrubí [m]	Rychlost průtoku vzduchu [m/s]					Průměr	Směr. odchylka	Min.	Max.
1	2,78	22,5	22,8	22,9	22,4	22,6	22,64	0,21	22,4	22,9
2	3,54	12,4	12,5	12,5	12,4	12,3	12,42	0,08	12,3	12,5
3	3,94	20,1	20,4	19,8	19,6	19,9	19,96	0,30	19,6	20,4
4	5,10	7,8	7,7	8,0	8,1	7,7	7,86	0,18	7,7	8,1
5	5,50	14,6	14,4	13,5	14,1	14,3	14,18	0,42	13,5	14,6
6	5,66	12,0	11,8	11,9	11,6	11,8	11,82	0,15	11,6	12,0
7	7,06	13,8	13,9	14,2	14,4	14,1	14,08	0,24	13,8	14,4
8	8,22	9,9	9,7	10,6	10,5	9,8	10,10	0,42	9,7	10,6
9	8,62	11,3	11,2	11,6	11,5	11,0	11,32	0,24	11,0	11,6
10	9,78	7,5	7,3	7,6	7,8	7,5	7,54	0,18	7,3	7,8
11	10,18	10,6	10,5	10,7	10,6	10,0	10,48	0,28	10,0	10,7
12	11,34	6,5	6,4	6,7	6,6	6,3	6,50	0,16	6,3	6,7

Tab. 23 Hodnoty objemu vzduchu místo B

Pracoviště	Délka potrubí [m]	Objem vzduchu [m ³ /min]					Průměr	Směr. odchylka	Min.	Max.
1	2,78	8,967	8,926	9,189	9,130	9,202	9,08	0,13	8,926	9,202
2	3,54	5,418	5,287	5,380	5,350	5,359	5,36	0,05	5,287	5,418
3	3,94	7,707	7,732	7,816	7,698	7,932	7,78	0,10	7,698	7,932
4	5,10	3,204	3,208	3,187	3,225	3,211	3,21	0,01	3,187	3,225
5	5,50	5,590	5,644	5,640	5,619	5,625	5,62	0,02	5,590	5,644
6	5,66	4,695	4,800	4,708	4,695	4,625	4,70	0,06	4,625	4,800
7	7,06	5,056	5,002	4,972	5,098	5,157	5,06	0,07	4,972	5,157
8	8,22	3,561	3,607	3,612	3,618	3,605	3,60	0,02	3,561	3,618
9	8,62	3,805	3,893	3,939	4,023	4,032	3,94	0,09	3,805	4,032
10	9,78	3,066	3,078	3,091	3,074	3,085	3,08	0,01	3,066	3,091
11	10,18	3,561	3,767	3,901	3,931	4,015	3,84	0,18	3,561	4,015
12	11,34	2,713	2,704	2,700	2,646	2,625	2,68	0,04	2,625	2,713

Místo měření C:

Výpočet plochy potrubí za tvarovkou typu T.

$$S = 3,14 \cdot 0,025^2 = 0,00196m^2$$

Změřil rychlost průtok a objemové množství vzduchu na všech pracovištích u sekundárního potrubí za tvarovkou typu T.

Tab. 24 Hodnoty rychlosti průtoku vzduchu místo C

Pracoviště	Délka potrubí [m]	Rychlost průtoku vzduchu [m/s]					Průměr	Směr. odchylka	Min.	Max.
1	1,93	28,1	28,3	28,2	28,7	28,5	28,36	0,24	28,1	28,7
2	2,83	21,4	22,3	22,6	22,8	22,9	22,40	0,60	21,4	22,9
3	3,23	20,1	20,3	20,6	20,4	20,2	20,32	0,19	20,1	20,6
4	4,44	17,7	17,6	17,5	17,6	17,4	17,56	0,11	17,4	17,7
5	4,79	16,4	16,6	16,9	17,1	17,2	16,84	0,34	16,4	17,2
6	5,95	13,5	13,6	13,7	13,9	14,0	13,74	0,21	13,5	14,0
7	6,40	13,6	13,7	13,9	14,1	14,0	13,86	0,21	13,6	14,1
8	7,57	10,7	11,1	11,2	11,2	11,0	11,04	0,21	10,7	11,2
9	7,96	11,2	11,3	11,4	11,3	11,4	11,32	0,08	11,2	11,4
10	9,12	9,9	10,3	10,2	10,0	10,1	10,10	0,16	9,9	10,3
11	9,41	9,9	10,5	10,4	10,5	10,6	10,38	0,28	9,9	10,6
12	10,57	9,3	9,4	9,3	9,2	9,1	9,26	0,11	9,1	9,4

Tab. 25 Hodnoty objemu vzduchu místo C

Pracoviště	Délka potrubí [m]	Objem vzduchu [m ³ /min]					Průměr	Směr. odchylka	Min.	Max.
1	1,93	3,211	3,219	3,217	3,216	3,216	3,22	0,00	3,211	3,219
2	2,83	2,773	2,797	2,769	2,743	2,739	2,76	0,02	2,739	2,797
3	3,23	2,739	2,758	2,786	2,792	2,785	2,77	0,02	2,739	2,792
4	4,44	2,223	2,228	2,230	2,224	2,233	2,23	0,00	2,223	2,233
5	4,79	2,257	2,250	2,242	2,214	2,205	2,23	0,02	2,205	2,257
6	5,95	1,676	1,662	1,668	1,670	1,680	1,67	0,01	1,662	1,680
7	6,40	1,525	1,512	1,518	1,539	1,538	1,53	0,01	1,512	1,539
8	7,57	1,323	1,333	1,330	1,335	1,340	1,33	0,01	1,323	1,340
9	7,96	1,366	1,384	1,395	1,388	1,378	1,38	0,01	1,366	1,395
10	9,12	1,219	1,243	1,252	1,252	1,258	1,24	0,02	1,219	1,258
11	9,41	1,226	1,226	1,228	1,238	1,249	1,23	0,01	1,226	1,249
12	10,57	1,072	1,076	1,077	1,076	1,078	1,08	0,00	1,072	1,078

Místo měření D:

Výpočet plochy potrubí před odsávací jednotkou

$$S = 3,14 \cdot 0,05^2 = 0,00785m^2$$

Nakonec odpojil primární potrubí a změřil objemové množství a rychlost průtoku přímo za odsávací jednotkou.

Tab. 26 Hodnoty rychlosti průtoku vzduchu místo D

Rychlost průtoku vzduchu [m/s]					Průměr	Směr. odchylka	Min.	Max.
27,5	27,6	27,6	27,5	27,4	27,52	0,08	27,4	27,6

Tab. 27 Hodnoty objemu vzduchu místo D

Objem vzduchu [m ³ /min]					Průměr	Směr. odchylka	Min.	Max.
11,590	11,620	11,600	11,560	11,530	11,58	0,04	11,530	11,620

8.6 Vyhodnocení měření

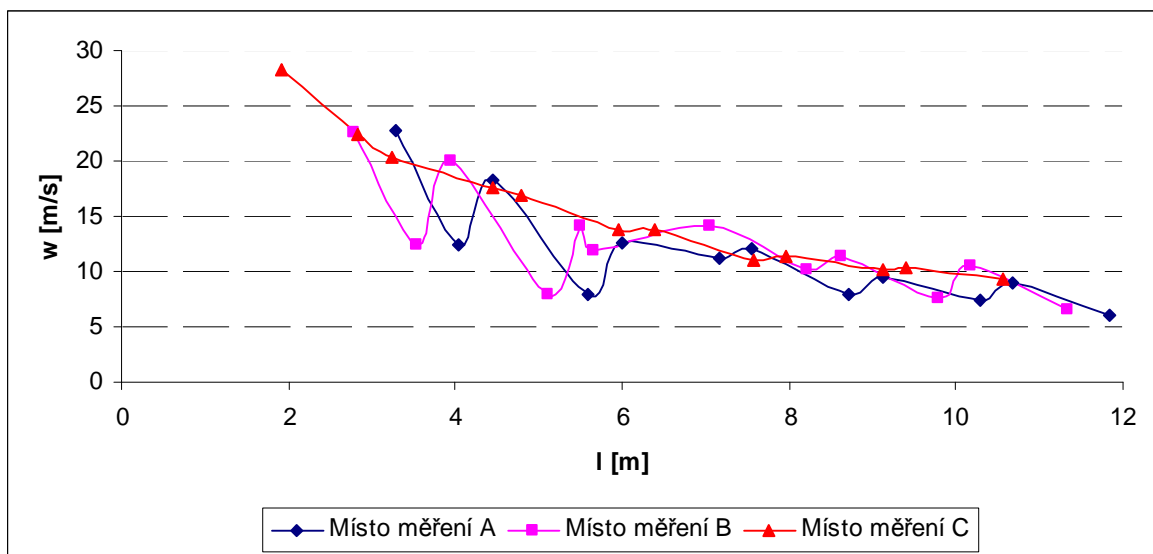
Měřil jsem rychlosti průtoku vzduchu m/s a objemové množství vzduchu m³/min pomocí anemometru na zvolených místech odsávacího systému.

Naměřená data jsem zpracoval formou tabulky a do grafů jsem vynesl závislost průtokové rychlosti vzduchu a objemového množství vzduchu na délce potrubí.

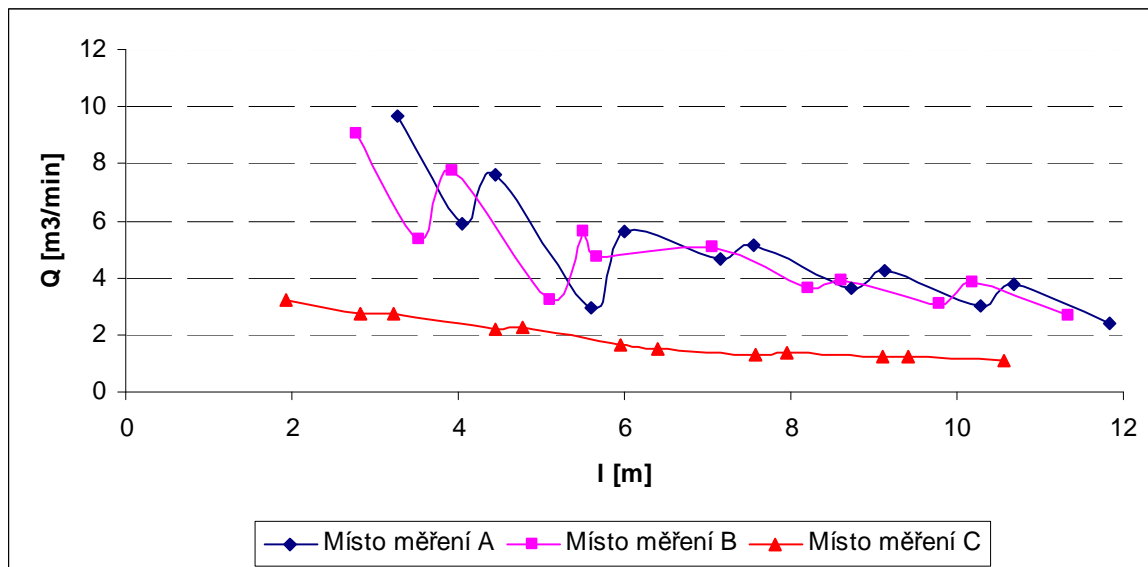
l – délka potrubí [m]

Q – objemové množství vzduchu [m³/min]

w – průtoková rychlost vzduchu [m/s]



Obr. 39 Závislost průtokové rychlosti vzduchu na délce potrubí



Obr. 40 Závislost objemového množství vzduchu na délce potrubí

Z obrázků je vidět, že s narůstající délkou potrubí klesá jednak průtoková rychlost i protečené množství vzduchu. Dále si můžeme všimnout, že v místě měření A, B u pracovišť 2, 4, 6, 8, 10, 12, dochází ke značnému poklesu průtokové rychlosti i protečeného množství vzduchu, což je důsledkem částečného zanesení potrubí zplodinami vlivem častějšího používání.

Pro kontrolu jsem provedl odpojení náustku a ověřil, že je tomu skutečně tak.



Obr. 41 Zanesení náustku

Měření jsem provedl pouze v jednom časovém intervalu. Tím nemohu z dlouhodobého hlediska posoudit jak velký vliv mají zplodiny na zanášení potrubí.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo vytvořit náhled do problematiky odsávání škodlivin v elektronické výrobě. Nastudovat danou problematiku, znalosti aplikovat na praktickém měření a přehledně zpracovat.

Dospěl jsem k závěru, že zplodiny vzniklé od technologických procesů mají velký vliv na zdraví člověka. Při volbě vhodného odsávacího systému musíme zvážit pro jakou technologii budeme jednotku navrhovat, dále jestli je pro nás výhodnější flexibilita potom zvolíme některou z mobilních jednotek nebo chceme odsávat zplodiny z více pracovních míst v tom případě nám postačí výkonnější stacionární jednotka.

Při proudění plynů potrubím a různých typů tvarovek jsem došel k závěru, že kruhové průřezy vykazují menší tlakové ztráty než průřezy čtyřhranné. Samotné proudění plynů v potrubí je poměrně složitý děj, kde charakter proudu závisí na velikosti Reynoldsova čísla. U tvarovek které mění průřez hraje velkou roli úhel zúžení případně rozšíření profilu.

Odsávací jednotky, zejména pak jejich ventilátory vykazují při provozu určitý hluk, který negativně působí na lidské zdraví. Určitý hluk vzniká turbulentním průtokem vzduchu v potrubí, ten však můžeme zanedbat.

Pro měření parametrů u odsávacích systémů je výhodné použít Pradtl. Trubici v kombinaci s vhodným anemometrem. Venturiho trubice se používá převážně na kalibraci Prandtl. trubice.

V praktické části jsem navrhl metodu měření rychlosti průtoku vzduchu pomocí anemometru a aplikoval ji na reálném odsávacím systému ve firmě ELKO. Kde jsem ověřil že s narůstající délkou potrubí klesá jednak průtoková rychlost i protečené množství vzduchu.

Podářilo se tedy vytvořit jednoduchý, ale přesto přehledný průřez problematikou odsávání škodlivin v elektronické výrobě, který má studentům sloužit jako studijní pomůcka.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The aim of my thesis was to create a look in the area of pollutants extraction in electronic production, to get up corresponding knowledge and apply it for practical measurement and results processing.

I have concluded the technological pollutants are harmful substances influencing the human health. The extraction system design depends on target technology, layout flexibility and number of workbenches to be serviced by the extraction system. A those aspects determine the choice of the main extraction unit exhaust power.

In course of gase flow in pipelines study, I have learned that circular pipes have lower loss in power in comparison to the rectangular ones. The gas flow itself is a complex process which characteristics depends on the Reynolds number. The necking or diameter enlargement at shaped pipe elements plays the critical role.

Extraction units, namely suction fans, are quite noisy during operation what can influence the human health as well. Noise is generated also by a turbulent gas stream in the pipe lines but it is less significant than the noise generated by fans. It is serviceable to use the Prandtl tube in combination with an anemometer for extraction systems parameter measurement.. The Venturi tube is mainly applied for Prandtl tube calibration.

In the practical part of my thesis, I have designed the gas flow velocity measurement method and I applied it on the real extraction system in ELKO company production line. I have confirmed that the extraction gas flow velocity and volume decreases with the length of ductwork.

I have created a brief but lucid overview in the field of extraction in electronic production what can serve as an introduction manual and aid for study.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] David V. Chadderton: A practical introduction: Air Conditioning, December 1997
ISBN10:0-203-47736-7
- [2] Aplikační manuál anemometru CFM 407119A: firmy Extech instruments
- [3] J. Chyský, K. Hemzal a kol.: Větrání a klimatizace, Brno 1993
- [4] Jan čermák a kolektiv: Ventilátory, Praha 1974
- [5] M.Adámek, S.Vavruša: Hmotnostní měření malých průtoků tekutin v uzavřených kanálech
- [6] R.H.Macmillan: Manuál: measurement of Air flow, October 2003, Dostupné na
WWW: www.purexlimited.co.uk
- [7] P.J.Moriarty, A.C.Hansen: AeroDyn Theory Manual, January 2005, Dostupné na
WWW: www.osti.gov/bridge
- [8] Compressible air flow calculation - theory: Výpočty, Dostupné na WWW:
www.pipeflowcalculations.com/airflow/theory.htm
- [9] Jackson Hall: Air Flow in pipes, Dostupné na WWW: <http://me.ca/courses/>
- [10] Měření průtoku a výšky hladiny: Technické informace firmy Omega, Dostupné na
WWW: www.omegaeng.cz
- [11] Mabramowski: Brožura: Odsávací a filtrační zařízení pro kouř a prach, Dostupné na
WWW: www.tekanet.de
- [12] Kemper: Odsávací systémy, Dostupné na WWW: www.kemper.cz
- [13] Web o vzduchotechnice a klimatizaci, Dostupné na WWW: <http://qpro.cz/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Δ – konečný rozdíl dvou hodnot

Ψ - proudová funkce

α - úhel

ξ - ztrátový součinitel

ν - kinematická viskozita

φ - průtokové číslo

λ - výkonové číslo, součinitel tření

η - účinnost, dynamická viskozita

ρ - hustota

ω - úhlová rychlost

A - rozměr

B – charakteristické číslo, rozměr

C – konstanta sítě

d – rozměr průřezu

f – kmitočet

g – gravitační zrychlení

h - výška

k – drsnost, koeficient

L – hladina akustického tlaku, délka

l – délka

\dot{m} - hmotnostní průtok

n – otáčky, exponent rychlostního profilu

P – příkon, výkon

p – tlak

p_s - statický tlak

p_d - dynamický tlak

p_g - hydrostatický tlak

p_{zt} - tlaková ztráta třením

p_{zm} - tlaková ztráta místními odpory

Q – proud vzduchu, objemové množství

R – tepelný odpor, měrná tlaková ztráta

Re- reynoldsovo číslo

r – průřez

S - plocha průřezu

u - obvodová rychlost

\dot{V} – objemový průtok

W- akustický výkon

w- rychlost průtoku

x- vzdálenost

x,y,z – složky vnějšího zrychlení

y- vzdálenost

z – počet lopatek

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1</i> Možné zdravotní následky způsobené prachem a kouřem.....	11
<i>Obr. 2</i> Stacionární jednotka.....	15
<i>Obr. 3</i> Mobilní jednotka.....	15
<i>Obr. 4</i> Typy nástavců	16
<i>Obr. 5</i> Princip odsávání zplodin pro více pracovišť.....	17
<i>Obr. 6</i> Jednotka 210 Powerflow Tip Extraktor.....	18
<i>Obr. 7</i> Pojízdňé jednotky s odsávacím ramenem	19
<i>Obr. 8</i> Stacionární jednotky s odsávacím jeřábem	21
<i>Obr. 9</i> Typy jednotek - systém 8000.....	23
<i>Obr. 10</i> Čištění znečištěného vzduchu pomocí cyklonu	24
<i>Obr. 11</i> Axiální ventilátor	27
<i>Obr. 12</i> Radiální ventilátor.....	28
<i>Obr. 13</i> Procentní charakteristiky ventilátorů.....	30
<i>Obr. 14</i> Ventilátor.....	31
<i>Obr. 15</i> Tvarovky vzduchovodů pro rozvod.....	34
<i>Obr. 16</i> Obloukové tvarovky – kruhové, čtyřhranné, segmentové	44
<i>Obr. 17</i> Závislost součinitele místního odporu pro čtyřhranné oblouky 90°.....	45
<i>Obr. 18</i> Tvarovky kolena – kruhová, čtyřhranná s vodícími plechy	46
<i>Obr. 19</i> Závislost součinitele místního odporu pro kolena 90°	47
<i>Obr. 20</i> Tvarovky pro rozšíření průřezu – difuzor.....	49
<i>Obr. 21</i> Závislost součinitele místního odporu pro difuzor- souměrný přechod.....	50
<i>Obr. 22</i> Závislost součinitele místního odporu pro konfuzor- souměrný přechod	51
<i>Obr. 23</i> Tvarovky pro rozdělování a spojování proudů.....	52
<i>Obr. 24</i> Vznik sirénového hluku ventilátoru	55
<i>Obr. 25</i> Relativní hladiny akustického výkonu ventilátoru	56
<i>Obr. 26</i> Hladina hluku elektromotoru ve vzdálenosti 1 m.....	57
<i>Obr. 27</i> Venturiho trubice.....	59
<i>Obr. 28</i> Prandtlůva trubice.....	61
<i>Obr. 29</i> Rozmístění bodů pro měření dynamického tlaku.....	62
<i>Obr. 30</i> Měřící body.....	62
<i>Obr. 31</i> Měřící přístroje používané v praxi	64
<i>Obr. 32</i> Odsávací jednotka Laserex 9000.....	69
<i>Obr. 33</i> Celkové složení systému	70
<i>Obr. 34</i> Důležité rozměry systému	70
<i>Obr. 35</i> Použité typy tvarovek.....	71
<i>Obr. 36</i> Rozměry náustku.....	71
<i>Obr. 37</i> Odsávací rameno s náustkem	71
<i>Obr. 38</i> Stanovená místa měření.....	72
<i>Obr. 39</i> Závislost průtokové rychlosti vzduchu na délce potrubí	76
<i>Obr. 40</i> Závislost objemového množství vzduchu na délce potrubí.....	77
<i>Obr. 41</i> Zanesení náustku	77

SEZNAM TABULEK

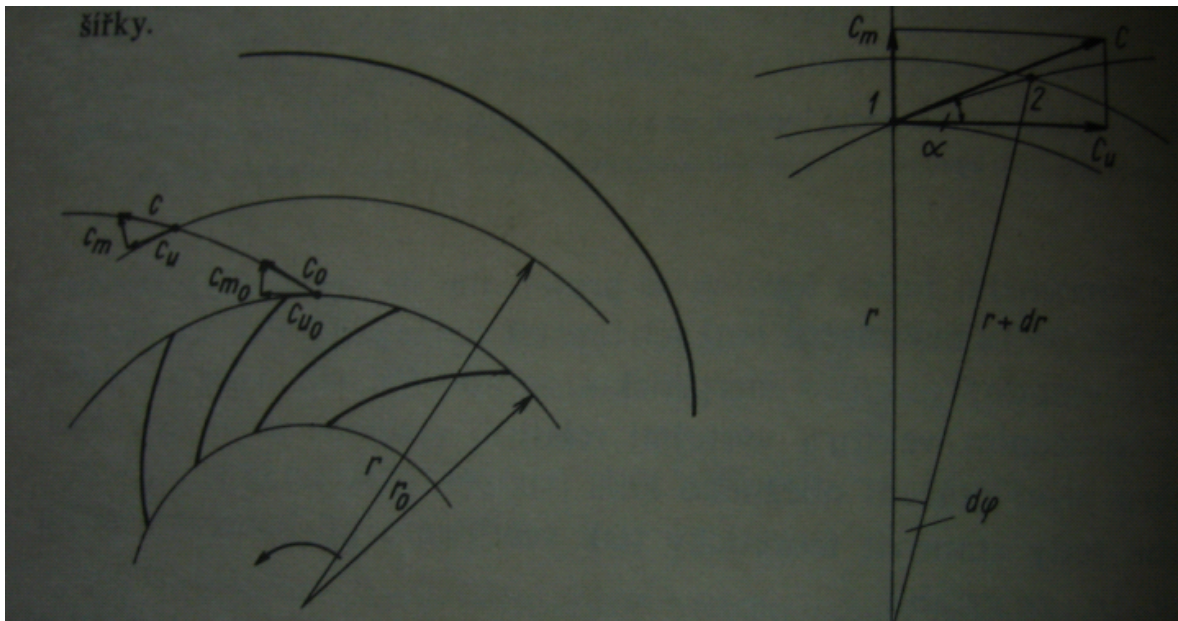
Tab. 1 Parametry stacionární a mobilní odsávací jednotky typu exPOD	17
Tab. 2 Technické parametry jednotek	19
Tab. 3 Technické parametry jednotek typ – systém 8000	23
Tab. 4 odlupčivost cyklónových odlučovačů	25
Tab. 5 Typy používaných ventilátorů	31
Tab. 6 Rozměry potrubí z ocelového plechu	32
Tab. 7 Porovnání čtyřhranného potrubí s kruhovým	33
Tab. 8 Závislost exponentu n na Re	38
Tab. 9 Hodnoty drsnosti stěn potrubí	41
Tab. 10 Součinitele místního odporu pro čtyřhranné oblouky 90°	45
Tab. 11 Součinitel místního odporu pro kolena 90°	46
Tab. 12 Hodnoty tlakové ztráty tvarovek - změna směru	47
Tab. 13 Součinitel místního odporu pro difuzor- souměrný přechod	49
Tab. 14 Součinitel místního odporu pro konfuzor - souměrný přechod	50
Tab. 15 Hodnoty tlakové ztráty tvarovek přechodů	51
Tab. 16 Relativní hladina vlastního hluku potrubí	57
Tab. 17 Relativní hladiny akustického výkonu pravoúhlých oblouků a kolen [dB]	58
Tab. 18 Délky používaných Prandtl. trubic	63
Tab. 19 Údaje ze štítku	69
Tab. 20 Hodnoty rychlosti průtoku vzduchu místo A	73
Tab. 21 Hodnoty objemu vzduchu místo A	73
Tab. 22 Hodnoty rychlosti průtoku vzduchu místo B	74
Tab. 23 Hodnoty objemu vzduchu místo B	74
Tab. 24 Hodnoty rychlosti průtoku vzduchu místo C	75
Tab. 25 Hodnoty objemu vzduchu místo C	75
Tab. 26 Hodnoty rychlosti průtoku vzduchu místo D	75
Tab. 27 Hodnoty objemu vzduchu místo D	76

SEZNAM PŘÍLOH

- P I PROUDĚNÍ VE SPIRÁLNÍ SKŘÍNI
- P II PRANDTL. A PITIT. TRUBICE - VÝPOČET PROUDĚNÍ
- P III VENTURIHO. TRUBICE - VÝPOČET PROUDĚNÍ

PI PROUDĚNÍ VE SPIRÁLNÍ SKŘÍNI

U radiálních ventilátorů se jako sběrné zařízení používá spirální skříň, v ní dochází k přemístění části kinetické energie vzduchu který opouští oběžné kolo ve statickou energii. Dále dochází k usměrnění průtoku vzduchu z obvodu oběžného kola do výstupního hrdla ventilátoru. Spirální skříň bereme jako zakřivený difuzor.



Obr. proudění ve spirální skříni

Na vzduchu ve spirální skříni nepůsobí vnější moment, takže Eulerovu rovnici uvažujeme ve tvaru:

$$c_{u0} \cdot r_0 - c_u \cdot r = 0$$

$$c_{u0} \cdot r_0 - c_u \cdot r = konst$$

c_{u0} - obvodová složka absolutní rychlosti vzduchu na výstupu z oběžného kola

c_u - obvodová složka absolutní rychlosti ve spirální skříni

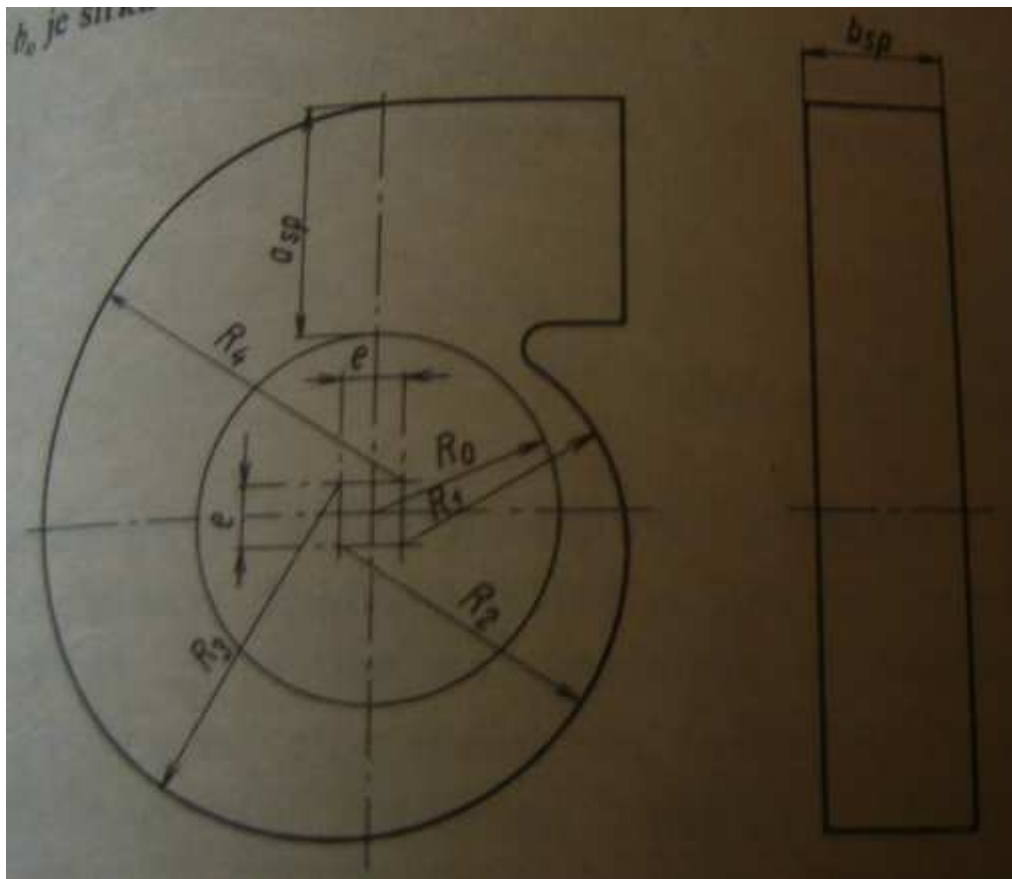
r - poloměr

Pro rovnici kontinuity platí:

$$c_{m0} \cdot r_0 \cdot b_0 = c_m \cdot r \cdot b$$

b_0 - šířka oběžného kola

b - šířka spirální skříně



Obr. Rozměry spirální skříňe

Vztah pro směr proudu ve spirální skříni stanovíme podle vztahů 8 a 9.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{c_m}{c_u} = \frac{c_{no}}{c_{uo}} = \frac{dr}{rd\varphi} = \operatorname{konst}$$

U praktických výpočtů postupujeme tak, že zvolíme rychlost v poměru k obvodové složce oběžného kola dle vztahu:

$$\frac{c_{sp}}{c_{uo}} = 0,6 \rightarrow 0,7[-]$$

c_{sp} - rychlost ve spirální skříni [m/s]

c_{uo} - obvodová složka absolutní rychlosti vzduchu na výstupu z oběžného kola

Následně určíme rozevření spirální skříňe a její šířku při objemovém průtoku:

$$a_{sp} \cdot b_{sp} = \frac{Q_v}{c_{sp}} [m]$$

a_{sp} - rozevření spirální skříňe [m]

b_{sp} - šířka spirální skříňe [m]

Q_v - objemový průtok

V praxi pro počítání uvažujeme spirálu jako čtyři kruhové oblouky, viz obr. Rozměry e

stanovíme : $e = \frac{a_{sp}}{4} [m]$

P II PRANDTL A PITOT TRUBICE VÝPOČET PROUDĚNÍ

Prandtlůva sonda se používá pro měření rychlosti v konkrétním místě proudu tekutiny.

Vlastně se Prandtlůva sonda měří tlak a rychlost se vypočítá Prandtlůva Sonda je navržena tak, aby měřila jak celkový tlak tak i statický tlak. Statický tlak je tlak tekutiny v toku proudu.

Celkový tlak je tlak tekutiny, kdy je rychlost snížena na 0.

Nestlačitelné proudění

Podíváme-li se v Bernoulliho rovnici pro dva body v oblasti toku ve stejné nadmořské výšce $z_1 = z_2$:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2}$$

p - tlak

ρ - hustota

V - rychlost

můžeme snadno dostat rovnice pro celkový tlak (je-li rychlost v bodě 2 je rovna nule, tlak v bodě 2 je pak celkem):

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} = \frac{p_t}{\rho}$$

p_t - celkový tlak

Vlastně, v případě Prandtl sondy, existuje pouze jeden bod na toku oblasti.

Rozdíl mezi celkovou a statického tlaku tekutiny představuje kinetická energie a to se nazývá dynamický tlak (p_d):

$$p_t - p = p_d = \frac{\rho V^2}{2}$$

Takže, pro měření rychlosti s Prandtl sondy je nutné změřit statický tlak (měřeno tak, aby průtok nebyl narušen) a celkový tlak (měřeno v místě, kde je rychlost 0 - tok se zastavil).

Rozdíl mezi těmito dvěma tlaky - dynamický tlak, používá se pro výpočet rychlosti.

$$V = \sqrt{\frac{2(p_t - p)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2p_d}{\rho}}$$

Komprimovatelné tok

Pro plyny s větším Machovým číslem než 0,1 nelze účinky stlačitelnosti zanedbat.

Pro výpočet stlačitelného plynu, uvažujeme ideální plyn. Rychlost pro Machovo číslo $M < 1$ se vypočte pomocí následující rovnice.

$$\frac{p_t - p}{\frac{\rho V^2}{2}} = \left(\left(1 + \frac{\chi - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{\chi}{\chi - 1}} - 1 \right) \frac{2}{\chi M^2}$$

M - Machovo číslo

χ - isentropic koeficientem

Pokud Machovo číslo $M > 1$, přijde nárazová vlna. V tomto případě, Prandtl sondy měříme tlaky za nárazovou vlnou. Celkový tlak a statický tlak je menší než v přední části vlny.

Rovnice pro rychlost v přední části vln je :

$$\frac{p_t - p}{\frac{\rho V^2}{2}} = \frac{2}{\chi M^2} \left(\frac{\left(1 + \frac{\chi - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{\chi}{\chi - 1}}}{\left(\frac{2\chi}{\chi + 1} M^2 - \frac{\chi - 1}{\chi + 1} \right)^{\frac{1}{\chi - 1}} \left(\frac{(\chi - 1)M^2 + 2}{(\chi + 1)M^2} \right)^{\frac{\chi}{\chi - 1}}} - 1 \right)$$

p_{t1} - celkový tlak za normální nárazovou vlnou

P III VENTURIHO TRUBICE VÝPOČET PROUDĚNÍ

Výpočet proudění Venturiho trubice je pro **nestlačitelné proudění**, a to na základě

Bernoulliho rovnice:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + g z_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + g z_2 + \frac{\Delta p_{1-2}}{\rho}$$

p - tlak

ρ - hustota

V - rychlost

g - gravitační konstanta (9,81 m / s²)

z – nadmořská výška

Předpokládáme, že tlaková ztráta je zanedbatelná:

$$\Delta p_{1-2} = 0$$

a:

$$g z_1 = g z_2$$

Pro výpočet rychlosti z průtoku:

$$V_1 = \frac{4Q}{\pi D_1^2} \quad V_2 = \frac{4Q}{\pi D_2^2}$$

Q - objemový průtok

D - průměr

Pokles tlaku přes Venturiho trubici zvýší rychlost a vypočítáme ho:

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = \frac{1}{2} \left(\frac{16Q^2}{\pi^2 D_2^4} - \frac{16Q^2}{\pi^2 D_1^4} \right)$$

nebo:

$$\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho} = \frac{16Q^2}{\pi^2} \left(\frac{1}{D_2^4} - \frac{1}{D_1^4} \right)$$

Vyjádření průtok z předchozí rovnice:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4}} \frac{\pi D_2^2}{4} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

Nahrazení:

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4}}$$

průtok může být stanovena jako:

$$Q = CE \frac{\pi D_2^2}{4} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

kde C je součinitel vypouštění

Ostatní hodnoty jsou vypočítány pomocí následující rovnice:

hmotnostní tok:

$$G = \rho Q$$

rychlosti:

$$V_1 = \frac{4Q}{\pi D_1^2} \quad V_2 = \frac{4Q}{\pi D_2^2}$$

plyn je považován za ideální a nestlačitelnou kapalinu. Rovnice pro ideální plyn:

$$\frac{p}{\rho} = RT$$

může být použita pro výpočet teplota T:

$$T = \frac{p}{R\rho}$$

stejně jako hustota ρ :

$$\rho = \frac{p}{RT}$$

kde R je plynová konstanta ($R = 287 \text{ J / kgK}$ o ovzduší)

Koeficient vypouštění C

Pro Venturiho trubice s průměrem v rozmezí $D = (200 - 1200 \text{ mm})$, $D_2 / D_1 = (0,4 - 0,7)$ a $D = \text{Re} (2 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-6})$ koeficient vypouštění je $C = 0,985$.

Pro tento případ bylo k výpočtu koeficientu C použita následující rovnice:

$$C = a + b (\log \text{Re})^2 + c (\log \text{Re})^3$$

. kde a, b, c jsou závislé na typu Venturiho trubice.

Pro svařované trubky, tyto koeficienty jsou:

$$a=0.70304970 \quad a = 0.70304970$$

$$b=0.00490015 \quad b = 0.00490015$$

$$c=-0.00024547 \quad c = -0.00024547$$

Pro sestavené trubice jsou:

$$a=0.60892370 \quad a = 0.60892370$$

$$b=0.00659844 \quad b = 0.00659844$$

$$c=-0.00033123 \quad c = -0.00033123$$

A pro obrobky jsou:

$$a=0.49670179 \quad a = 0.49670179$$

$$b=0.00873339 \quad b = 0.00873339$$

$$c=-0.00044367 \quad c = -0.00044367$$

Reynoldsov číslo se vypočítá pomocí známé rovnice:

$$\text{Re}_D = \frac{VD}{\nu} = \frac{\rho VD}{\mu}$$