



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

ČIŠTĚNÍ VZDUCHOTECHNICKÝCH SYSTÉMŮ A DOSAŽITELNÉ ENERGETICKÉ ÚSPORY

CLEANING OF VENTILATION SYSTEMS AND POTENTIAL ENERGY SAVINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MILAN LAPÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. VÍTĚZSLAV MÁŠA, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Milan Lapáček

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Čištění vzduchotechnických systémů a dosažitelné energetické úspory

v anglickém jazyce:

Cleaning of ventilation systems and potential energy savings

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V průmyslové praxi často VZT jednotky zajišťují výměnu silně znečištěného vzduchu, který ulpívá na stěnách potrubních tras. Nános nečistot pak způsobuje zvýšenou tlakovou ztrátu potrubí, která musí být kompenzována zvýšeným výkonem ventilátorů. Jedním z faktorů, který má pozitivní vliv na energetickou náročnost VZT jednotek, je proto pravidelné čištění potrubních tras. Diplomová práce přinese odpověď na otázku, jak významně zanášení ovlivňuje energetickou náročnost VZT systémů. Přínos čištění bude demonstrován na konkrétní případové studii. Téma zapadá do výzkumných aktivit realizovaných Laboratoří energeticky náročných procesů, NETME Centre.

Cíle diplomové práce:

1. Představení problematiky zanášení a čištění vzduchotechnických systémů.
2. Posouzení možností energetických úspor v oblasti průmyslové vzduchotechniky.
3. Zpracování uživatelské příručky k SW nástroji pro hodnocení vlivu znečištění potrubních tras na ekonomiku provozu VZT jednotky (SW nástroj byl již dříve vytvořen na UPEI).
4. Experimentální ověření vlivu čištění na příkon ventilátorů ve vybraném průmyslovém provozu.
5. Zhodnocení vypovídací schopnosti uvedeného SW nástroje na základě porovnání s experimentem a doporučení pro jeho další vývoj.

Seznam odborné literatury:

BYSTRICKÝ, V. : Technické zařízení budov-B, Nakladatelství ČVUT, Praha, 2006. 203 s. ISBN 80-0103450-X.

Cory, W.T.W.: Fans & ventilation: a practical guide. Elsevier, Amsterdam, 2005, 424 s., ISBN 0-080-44626-4.

ASHRAE, Handbook 2012 - Heating, ventilating and air-conditioning: systems and equipment. ASHRAE, Atlanta, 2012. ISBN 978-1-936504-26-8.

ZAATARI, M. et al.: The relationship between filter pressure drop, indoor air quality, and energy consumption in rooftop HVAC units. Building and Environment, Elsevier, 2014, doi:10.1016/j.buildenv.2013.12.010

Vedoucí diplomové práce: Ing. Vítězslav Máša, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 24. 11. 2014

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá posouzením vlivu zanášení potrubních tras na energetickou spotřebu vzduchotechnických systému. V první části je pozornost věnována typickým částem, které se podílí na tvorbě vnitřního prostředí budov a způsobu hodnocení náročnosti dopravy vzduchu. Jsou uvedeny teoretické základy proudění tekutin, režimy proudění a tlakové ztráty, které při nich vznikají. Práce představuje možné metody hodnocení vlivu znečištění s důrazem na sledování tlakových ztrát a jeho vlivu na příkon ventilátorů. Důležitou částí práce je vlastní experimentální měření ve vybraném průmyslovém provozu, ve kterém je sledován vliv čištění vzduchotechnických textilních vyústek na spotřebu elektrické energie systému ventilace. Pro další zkoumání procesu zanášení je navrhována a zkonstruována měřicí trať a uvedena vhodná metoda měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zanášení, průtok vzduchu, vzduchotechnické systémy, čištění, experimentální měření, tlakové ztráty, vzduchovody, úspory, ventilace.

ABSTRACT

The main aim of this thesis is to explore fouling of air ducts and its influence on energy consumption of HVAC systems. The first part focuses on typical parts that create the IAQ in buildings and on evaluating energy consumption of air transportation. The following section deals with the theories of fluid flow, flow regimes and pressure losses that are created as a side effect. The thesis outlines possible methods of assessing the impact of pollution with an emphasis on pressure losses and their influence on the fan power consumption. The actual experimental measurement, conducted in a selected industrial plant, is focused on an influence of cleanness of textile diffuser on HVAC device power consumption. For the further research of this process, measuring equipment with suitable measurement method is designed and constructed.

KEYWORDS

Fouling, airflow, ventilation systems, cleaning, experimental measurements, pressure losses, air ducts, HVAC.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE MÉ PRÁCE

LAPÁČEK, M. Čištění vzduchotechnických systémů a dosažitelné energetické úspory. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 78 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vítězslav Máša, Ph.D..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze s použitím uvedených zdrojů, odborné literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a dalších odborníků.

V Brně dne 25. 5. 2015

Milan Lapáček

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Vítězslavu Mášovi, Ph.D. za rady a ochotu při vedení mé diplomové práce a Ing. Petru Bobákovi, Ph.D. za spolupráci při realizaci měřicí tratě. Děkuji doc. Aleši Rubinovi za konzultaci a zapůjčení odborné literatury.

Za podporu z celého srdce děkuji především mé rodině, přítelkyni a všem obyvatelům Lulánkova. Rád bych také poděkoval Mgr. Lukáši Pešoutovi a MUDr. Ivě Mihulové za podporu při dokončení vysokoškolského studia.

Obsah

1 ÚVOD	- 12 -
2 VZDUCHOTECHNIKA JAKO SOUČÁST OBJEKTU	- 13 -
2.1 Základní rozdělení a definice vzduchotechnických systémů	- 13 -
2.2 Vnitřní prostředí budov	- 14 -
2.2.1 Tepelně vlhkostní mikroklima	- 15 -
2.2.2 Tvorba vnitřního mikroklimatu	- 16 -
2.3 Právní a normová ustanovení	- 17 -
2.3.1 Společné požadavky na vzduchotechniku	- 18 -
2.3.2 Požadavky na vzduchotechniku pracovišť	- 18 -
2.4 Použití vzduchotechniky v provozech	- 20 -
2.4.2 Aplikace ve specifických průmyslových provozech	- 20 -
3 VZDUCHOTECHNIKA A ENERGETICKÉ HLEDISKO	- 21 -
3.1 Vzduchotechnická jednotka	- 21 -
3.1.1 Klapky	- 23 -
3.2.2 Koncové prvky	- 23 -
3.2.3 Filtry	- 24 -
3.2.4 Ohřívače a chladiče	- 25 -
3.2.5 Výměníky zpětného získávání tepla	- 26 -
3.2.6 Ventilátory	- 27 -
3.2.7 Vzduchovody	- 28 -
3.3 Energetická spotřeba jednotky	- 28 -
3.3.1 Energetické hodnocení náročnosti dopravy vzduchu	- 29 -
3.3.2 Možnosti snižování energetické spotřeby dopravy vzduchu	- 31 -
3.3.3 Snižování energetické náročnosti vzduchotechnických systémů	- 32 -
4 PROUDĚNÍ VZDUCHU V POTRUBÍ	- 34 -
4.1 Charakter proudění	- 35 -
4.2 Tlakové ztráty	- 37 -
4.2.1 Délkové ztráty třením	- 37 -
4.2.2 Tlakové ztráty místní	- 39 -
4.2.3 Celková tlaková ztráta v potrubí	- 40 -
5 ZANÁŠENÍ A ČIŠTĚNÍ VENTILAČNÍCH SYSTÉMŮ	- 41 -
5.1 Zanášení ve vzduchovodech	- 42 -

5.1.1 Stádia zanášení.....	- 44 -
5.2 Čištění vzduchovodů	- 45 -
5.2.1 Kritéria čistoty	- 45 -
5.3 Metody čištění	- 47 -
5.3.1 Mechanické kartáčování.....	- 47 -
5.3.2 Tryskání suchým ledem.....	- 48 -
5.3.3 Čištění vodní parou	- 49 -
5.3.4 Čištění chemické	- 49 -
5.3.5 Čištění stlačeným vzduchem	- 49 -
5.4 Opatření proti zanášení	- 49 -
6 HODNOCENÍ VLIVU ZNEČIŠTĚNÍ	- 50 -
6.1 Výpočtový nástroj	- 51 -
6.1.1 Princip výpočtu	- 53 -
6.3 Experimentální hodnocení vlivu zanešení	- 54 -
7 NÁVRH MĚŘÍCÍ TRATĚ	- 55 -
7.1 Schéma měřicí tratě	- 55 -
7.2 Popis měřicí tratě.....	- 56 -
7.3 Metoda měření.....	- 57 -
7.3.1 Změna průřezu regulační clonou.....	- 57 -
7.3.2 Změna průřezu nastavením clony a vkládáním molitanových desek	- 57 -
7.3.3 Modifikace trati.....	- 58 -
7.4 Postup experimentu	- 59 -
7.5 Hlavní části měřicí tratě	- 59 -
7.6 Měřicí přístroje	- 60 -
8 MĚŘENÍ V PROVOZU	- 61 -
8.1 Místo měření	- 61 -
8.2 Plán měření.....	- 62 -
8.3 Současný stav	- 62 -
8.3.1 Režim chodu vzduchotechniky	- 62 -
8.3.2 Znečištění vyústky	- 63 -
8.3.3 Čištění vyústky.....	- 63 -
8.4 Měření příkonu	- 63 -
8.4.1 Metoda měření	- 64 -
8.5 Měřicí přístroje	- 64 -

8.6 Podmínky měření.....	- 64 -
8.7 Analýza výsledků	- 65 -
8.8 Ekonomické porovnání spotřeby elektrické energie	- 66 -
8.8.1 Výpočet pro půlroční čištění.....	- 67 -
8.8.2 Výpočet pro roční čištění.....	- 68 -
8.8.3 Ekonomické porovnání nákladů ventilátoru a ventilace chladírny	- 68 -
8.9 Vyhodnocení měření.....	- 69 -
9 ZÁVĚR.....	- 70 -
10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	- 71 -
11 SEZNAM ZKRATEK.....	- 75 -
12 SEZNAM SYMBOLŮ	- 75 -
13 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	- 76 -
14 SEZNAM PŘÍLOH.....	- 78 -

1 ÚVOD

Pro přívod a úpravu vzduchu se v budovách používají často složité vzduchotechnické (VZT) systémy, jejichž energetické nároky jsou významnou součástí celkových nákladů budovy. Pro tvorbu optimálního vnitřního prostředí budovy je často zapotřebí aparátů (tepelný výměník, zvlhčovač, ohřívač), které ke svému provozu využívají množství elektrické energie, tepla, příp. vody nebo páry. Jedním z významných spotřebičů elektrické energie jsou výkonné ventilátory, které slouží pro dopravu vzduchu sítí vzduchovodů.

Při proudění vzduchu vzduchovody má zásadní vliv na spotřebu elektrické energie tlaková charakteristika vzduchotechnické potrubní trasy, která je z velké části definovaná již v rámci návrhu VZT systému. Při montáži a během provozu vzniká riziko znečištění vnitřního povrchu VZT zařízení a vzduchovodů, které může postupně vést k výraznému zanášení vzduchovodů. Tento jev se týká především dopravy velmi znečištěného vzduchu, např. v průmyslu. Vzniklé zanešení ovlivňuje proudění potrubím a negativně přispívá k zvýšení tlakové ztráty pro dopravu vzduchu, především změnou průřezu průtočného profilu. Aby bylo možné dodržet konstantní průtok vzduchu, je nutné zvýšit požadovaný dopravní tlak ventilátoru např. zvýšením otáček ventilátoru, k čemuž se v současnosti stále více využívají frekvenční měniče.

Díky zavádění evropských směrnic se klade tlak na zvyšování energetické účinnosti spotřebičů elektrické energie mimo jiné i ventilátorů. Vedle zvyšování účinnosti samotných ventilátorů je vhodným úsporným opatřením minimalizace tlakových ztrát vzniklých právě zanášením potrubí. Toto opatření se projeví sníženou spotřebou elektrické energie, která je nutná pro dopravu vzduchu. Omezení zanášení představuje potenciální prostor pro zavádění inovací, bohužel se stále jedná o problematiku, ke které chybí dostatečné množství informací.

Zanešení potrubní sítě však představuje také hygienické riziko, které je mnohdy velmi důležité. Přítomné nečistoty mohou obsahovat mikroorganismy (plísně, bakterie, viry) škodlivé pro lidské zdraví. Díky časté rozlehlosti potrubní sítě se tyto nečistoty mohou šířit vzduchovody do různých částí vzduchotechnického systému. Nelze také opomenout požární riziko, které se přítomností hořlavého prachu na vnitřních stěnách zvyšuje. Pro odstranění nečistot a nánosů se používají různé metody čištění. Pravidelná údržba a inspekce čistoty VZT zařízení je prvním předpokladem pro volbu čisticí metody, která může být buď tradiční (suché, mokré čištění), či progresivní (čištění suchým ledem).

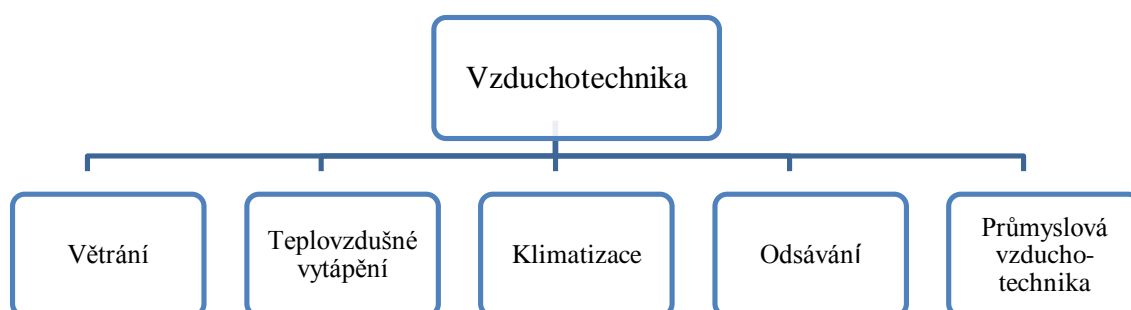
Pro vyhodnocení vlivu zanešení potrubní sítě na spotřebu energií lze použít výpočet tlakových ztrát nebo experimentální měření. Pomocí výpočetního nástroje uvedeného v práci lze tlakové ztráty přímo promítnout do ekonomiky provozu VZT zařízení. Experimentální ověření vlivu čištění na ekonomiku ventilace bude realizováno v konkrétním výrobním provozu. Pro zkoumání závislosti mezi příkonem ventilátoru a změnou průřezu vzduchovodu bude navržena a zkonstruována v Laboratoři energeticky náročných procesů NETME Centra experimentální měřící trať.

2 VZDUCHOTECHNIKA JAKO SOUČÁST OBJEKTU

Smyslem instalace systému vzduchotechniky (VZT) do jakékoliv budovy je vytvoření specifického vnitřního prostředí, tedy interního mikroklimatu. Vhodné vnitřní prostředí je nutné pro zajištění komfortu osob, případně zvířat, které se v objektu nacházejí. Hlavním prostředkem, kterým lze mikroklima ovlivnit je přívod čerstvého a odvod znečištěného vzduchu z budovy. Mluvíme tedy o **větrání** (ventilaci), při kterém je přiváděný i odváděný vzduch čišťen (filtrován). Úprava vzduchu, pro niž je charakteristické, že se záměrně mění teplota a vlhkost, se naopak nazývá **klimatizace**. Doprava a úprava vzduchu je v průmyslovém měřítku také často využívána k zajištění vhodných podmínek pro technologický postup výroby či skladování materiálu. Požadovaný stav vzduchu určují tedy dvě hlediska – požadavky osob a požadavky procesní. Na místech, kde jsou vysoké nároky na kvalitu ovzduší a zároveň i na kvalitu prostředí (operační sály, hygienické provozy aj.), se obě hlediska propojují. Účel ventilačních a klimatizačních zařízení je však jednoznačný, zabezpečení vhodného vnitřního prostředí při minimální spotřebě energie, ať už v obytném, či pracovním prostředí [1].

2.1 Základní rozdělení a definice vzduchotechnických systémů

Technická zařízení a jejich součásti zajišťující procesy úpravy vnitřního prostředí tvoří v budovách vzduchotechnický systém. Dle základní funkce můžeme soustavy vzduchotechniky dělit do několika podskupin (viz obr. 1). Jednotlivé VZT soustavy se liší účelem použití v budově i podstatou své funkce.



Obr. 1: Rozdělení vzduchotechniky [2]

Větrání je charakteristické výměnou znehodnoceného vzduchu za vzduch čistý neznehodnocený. Podmínkou je vytvoření rozdílného tlakového spádu, který je hnací silou výměny. Rozeznáváme systém větrání přirozený a nucený. V prvním případě je proudění vzduchu vyvoláno účinkem přírodních sil (rozdíl teplot, gravitace, vítr). Přirozené větrání je základním systémem pro větrání bytů, budov, průmyslových i zemědělských objektů. V druhém případě větrání využívá pro pohyb vzduchu mechanické zařízení, zpravidla ventilátor. Nucené větrání může být dále děleno na komfortní, technologické, průmyslové a účelové [3]. Uplatnění je velmi široké a nalezneme jej v různých formách ve většině větraných budov. Z hlediska termodynamiky plní větrání jednu resp. dvě termodynamické funkce: ohřev a chlazení.

Teplovzdušné vytápění zajišťuje přívodem vzduchu o vyšší teplotě ohřátí uzavřeného prostoru, kryje tedy tepelnou ztrátu. Jelikož je při něm často použit vzduch venkovní nebo je vnitřní vzduch čištěn soustavou filtrů, plní z části i funkci větrání. Teplovzdušné vytápění nachází široké uplatnění v budovách občanských (nákupní centra, sportovní haly) i průmyslových (skladovací a průmyslové haly), a to především v zimních měsících, ve kterých klesá venkovní teplota pod bod mrazu. Při provozu teplovzdušného vytápění se uplatňuje termodynamická funkce ohřev.

Klimatizaci lze definovat jako řízenou úpravu stavu vnitřního mikroklimatu. Klimatizace tak větráním, filtrací a změnou teploty i vlhkosti přívodního vzduchu zajišťuje všechny složky tepelně vlhkostního prostředí místnosti či budovy. U klimatizace často mluvíme o klimatizačním centrálním systému, který zajišťuje úpravu ovzduší pro rozsáhlé části budov. Klimatizační jednotka naopak upravuje vzduch až přímo v klimatizovaném prostoru, tj. v jednotlivých místnostech [4]. Systémy lze dělit dle technického provedení a tekutiny rozvádějící teplo a chlad po budově na vzduchové, kombinované a chladičové. Z fyzikálního hlediska je klimatizační zařízení systém, který plní čtyři termodynamické funkce úprav vzduchu (chlazení, ohřev, vlhčení, odvlhčování). Se zvyšujícími se požadavky na stav prostředí se klimatizace stává vhodným prostředkem pro jeho tvorbu, především budov vyššího standardu. Příkladem použití klimatizační jednotky nebo systému jsou divadla, kanceláře, hotely, restaurace, nemocnice aj [3].

Odsávání slouží k zachycování nežádoucích látek (plynů, par, tuhých částic) nebo nadměrného tepla vzduchem a následného odvodu z místa jejich vzniku. Tím se zabraňuje jejich šíření do volného prostoru. Jedná se o místní přirozené či nucené větrání. Důvody pro použití místního odsávání jsou i ekonomické - je úspornější zajistit lokální výměnu vzduchu než větrat celý znečištěný prostor.

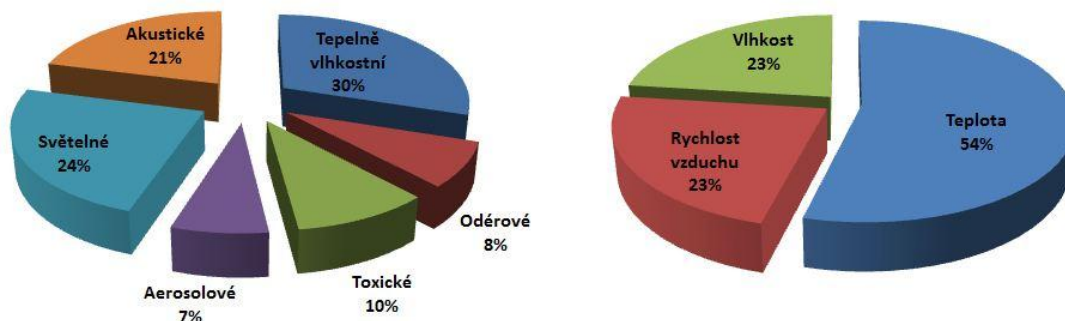
Průmyslová vzduchotechnika zahrnuje širokou oblast vzduchotechniky sloužící k větrání, vytápění i klimatizaci výrobních prostor. Samostatnou kapitolou je použití pro dopravu materiálu (pneumatická doprava), odlučování a sušení materiálu. Vzduchotechnika pro technologické účely představuje často velice složité a sofistikované zařízení, neboť se mnohdy musí vypořádat s náročnými podmínkami a zajištěním trvalého konstantního výkonu [5].

2.2 Vnitřní prostředí budov

Životní prostředí člověka je děleno mezi *vnější životní prostředí*, které představuje pohyb ve volném prostoru, a *vnitřní životní prostředí*, například pobyt v budovách. Prostor budov je místem, kde člověk tráví významnou část svého dne a které jej přímo ovlivňuje. Dle studie EPA (Environmental Protection Agency) [6] tráví lidé civilizovaného světa v uzavřených prostorách 90 % svého času, proto je vnitřní prostředí budovy jedním z hlavních činitelů, který ovlivňuje fyzický i psychický stav člověka.

Vnitřní prostředí (mikroklima) budovy je formováno *vnitřními a vnějšími* toky hmoty a energie (agencie). Jsou jimi například součásti ovzduší (aerosoly, mikroby, oděry, vodní páry, plyny), elektromagnetické jevy (světlo, ionizující záření, statická elektřina), teplo a akustické vlnění. Podle povahy působících agencií lze vnitřní mikroklima dělit do složek, jež tvoří tepelně

vlhkostní mikroklima, oděrové, aerosolové, akustické, mikrobiální, elektrostatické iontové a světelné mikroklima. Dílčí mikroklimata mají na celkovou úroveň prostředí rozdílný vliv, viz obr. 2. Zásadní vliv v budovách pro pobyt osob má *tepelně vlhkostní mikroklima*, které je zároveň VZT systémy nejvíce ovlivňováno.



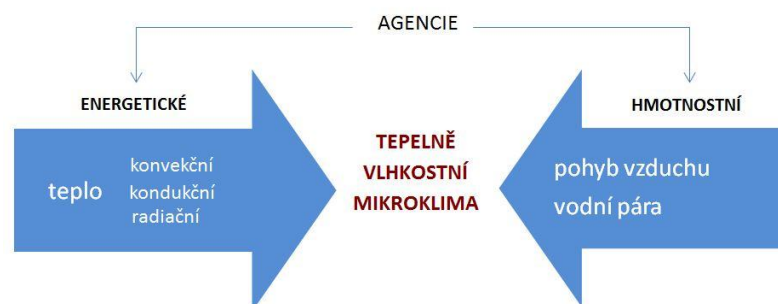
Obr. 2: Vliv dílčích mikroklimat na celkovou úroveň vnitřního prostředí budov [7]

2.2.1 Tepelně vlhkostní mikroklima

Tepelně vlhkostní mikroklima má dominantní vliv na celkové mikroklima. Základními složkami jsou teplo a vodní pára, které ve vnitřním prostředí vytváří tepelné a vlhkostní toky. Za předpokladu, že se parametry tepelně vlhkostního mikroklimatu pohybují v optimálních mezích, vytváří se stav zvaný *tepelná pohoda*. Faktory tepelné pohody jsou závislé na člověku i prostředí:

- Osobní faktory
 - Metabolické teplo člověka
 - Tepelný odpor oděvu
- Faktory prostředí
 - Teplota vzduchu
 - Relativní vlhkost
 - Rychlost vzduchu
 - Teplota okolních ploch

Jedna z definic uvádí, že ve stavu tepelné pohody je dosaženo takových tepelných poměrů, kdy člověku není chladno, ani příliš teplo – člověk se cítí příjemně. Podmínkou je dosažení tepelné rovnováhy, kdy okolí odebírá lidskému tělu právě tolik tepla, kolik produkuje. Přenos tepla se uskutečňuje vedením, prouděním, sáláním, dýcháním a vypařováním potu z pokožky. Tepelná pohoda člověka má daleko větší vliv na jeho pocit celkové pohody, míru odpočinku i skutečnou produktivitu práce, než nežádoucí emise či okolní hluk [8].



Obr. 3: Agencie vytvářející tepelně vlhkostní mikroklima

Zdrojem tepla i vlhkosti je kromě jiného člověk a jeho činnosti. Výdej tepelné energie člověka se uskutečňuje bazálním a svalovým metabolismem člověka a je závislý na intenzitě pohybové aktivity tedy na činnosti, kterou provozuje. Orientační hodnoty výdeje tepelné energie vztažené na plochu tělesného povrchu uvádí tab. 1. Průměrná plocha lidského těla je $1,8 \text{ m}^2$ [3]. Uvedené produkce tepla jsou podkladem pro definování tříd práce, které jsou součástí příslušných předpisů a vyhlášek upravujících danou oblast. Tato problematika je podrobněji rozebrána v kapitole 2.3.

Druh činnosti	Produkce tepla q_m [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	Druh činnosti	Produkce tepla q_m [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
Klid ve spánku	40	Středně těžká práce	120 - 160
Odpočinek vsedě	60	Těžká fyzická práce	180 - 380
Kancelářské práce	65 - 70	Chůze po rovině	110 - 230
Práce v domácnosti	90 - 120	Běh po rovině	380
Lehká fyzická práce	100 - 120	Tanec	140 - 260

Tab. 1: Produkce tepla metabolismu při různé činnosti (9)

2.2.2 Tvorba vnitřního mikroklimatu

Aktuální stav interního mikroklimatu místnosti a budov se záměrně upravuje provozem technických zařízení, především VZT systémů, tak aby výsledný stav vyhovoval osobám, technologickému procesu i ostatním podmínkám. Volba technických zařízení k tvorbě mikroklimatu je ovlivněna řadou faktorů (viz obr. 4), které úzce souvisí s působícími agenciemi. Volbu ovlivňují klimatické podmínky, stavební řešení budovy i přítomné složky mikroklimatu, které je třeba regulovat. Jsou zde však i ekonomické a ekologické faktory, které mají v dnešní době stále větší důležitost a nelze je zanedbat.



Obr. 4: Faktory podílející se na tvorbě vnitřního prostředí budov [9]

2.3 Právní a normová ustanovení

Vzduchotechnické systémy musí na prvním místě splňovat požadavky, které jsou na ně kladené zákonnými předpisy. Předpisy České republiky poskytují dostatek podkladů především pro hygienické požadavky vnitřního prostředí budov. Obecně vycházejí závazné požadavky na jednotlivé faktory prostředí a větrání z následujících zákonů:

- **Zákon č. 183/2006 Sb.**, o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon) v platném znění.
- **Zákon č. 262/2006 Sb.**, zákoník práce v platném znění.

Tyto legislativní předpisy udávají právní rámec, který je dále rozšiřován o právní normy. Hygienické požadavky jsou rozpracovány v prováděcích předpisech k těmto zákonům. K dispozici máme jednotlivá nařízení vlády a vyhlášky, nahrazující původní hygienické předpisy. Jelikož se vzduchotechnika týká většiny budov, kde přebývají lidé, vztahují se tyto předpisy na široké spektrum pracovišť a provozů (jídelny, nemocnice, školy, bazény, aj.)

V oblastech, které nejsou těmito předpisy pokryté, pomohou požadavky norem. Platné normy třídy 12 (Vzduchotechnická zařízení) byly se vstupem do Evropské unie postupně rozšířeny o nové evropské normy. Harmonizované platné normy pro oblast vzduchotechniky jsou:

- ČSN EN 15240 Větrání budov – Energetická náročnost budov.
- ČSN EN 13779 Větrání nebytových budov – Základní požadavky na větrací a klimatizační systémy.
- ČSN EN 12599 Větrání budov – Zkušební postupy a měřicí metody pro přejímky instalovaných větracích a klimatizačních zařízení.
- ČSN EN 15251 Vstupní parametry vnitřního prostředí pro návrh a posouzení energetické náročnosti budov s ohledem na kvalitu vnitřního vzduchu, tepelného prostředí, osvětlení a akustiky.
- ČSN EN 15665/Z1 Větrání budov – Stanovení výkonových kritérií pro větrací systémy obytných budov.

- ČSN EN 15780 Větrání budov – Vzduchovody – Čistota vzduchotechnických zařízení.
- ČSN EN 779 Filtry atmosférického vzduchu pro odlučování částic pro všeobecné větrání – Stanovení filtračních parametrů.
- ČSN ISO 29464 Prostředky pro čištění vzduchu a dalších plynů – Terminologie.

2.3.1 Společné požadavky na vzduchotechniku

Společné požadavky na vzduchotechnické systémy budov jsou uvedeny v paragrafu §37 vyhlášky 268/2009 Sb., o technických požadavcích na stavby, která je součástí zákona 183/2006 Sb. o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon).

§ 37 Vzduchotechnická zařízení

(1) Vzduchotechnické zařízení musí zajistit takové parametry vnitřního ovzduší větraných prostorů, aby vyhovělo hygienickým a technologickým požadavkům. Jeho provoz musí být bezpečný, hospodárný, nesmí ohrožovat životní prostředí a zdraví osob nebo zvířat. Vzduchotechnické zařízení musí umožnit požadované pravidelné čištění a údržbu.

Tyto společné požadavky se týkají všech vzduchotechnických zařízení bez ohledu na typ pracovního prostředí a účelů větrání. Pro rozdílná prostředí jsou specifikovány další požadavky, především hygienické limity na vnitřní prostor, ve kterém se vyskytuje větší počet lidí. V současnosti jsou platné tyto předpisy:

Typ prostředí	Předpis	Existují limity pro:
pracovní	NV č 361/207 Sb., ve znění NV č 93/2012 Sb.	TVM, chemické látky a prašnost, osvětlení, větrání
stravovací	Vyhláška č. 137/2004 Sb. ve znění č 602/2006 Sb.	žádné limity neexistují
školské	Vyhláška č 343/2009 Sb.	TVM, osvětlení, větrání
pobytové	Vyhláška č. 6/2003 Sb.	TVM, chemické látky a prašnost, výskyt mikroorganismů
bazény, sauny	Vyhláška č. 238/2011 Sb.	TVM, osvětlení, větrání, mikrobiální kontaminace vody
vnitřní prostředí staveb	Vyhláška č 20/2012 Sb.	větrání, koncentrace CO ₂

Pozn: NV = Nařízení vlády TVM = tepelně vlhkostní mikroklima

Tab. 2: Předpisy stanovující limity pro faktory vnitřního prostředí [10]

2.3.2 Požadavky na vzduchotechniku pracovišť

Podmínky na pracovišti ve vztahu k vnitřnímu prostředí jsou upravovány prováděcím předpisem č. 93/2012 Sb. Jsou zde stanovovány limity pro množství přiváděného vzduchu, operativní teplotu a relativní vlhkost na pracovišti. Rozmezí hodnot upravovaných předpisem se liší v závislosti na druhu a náročnosti práce, která je rozdělena do pěti tříd. Třídy práce jsou rozčleněny dle průměrného energetického výdaje osoby M [$W \cdot m^{-2}$] od nejnlehčích činností (práce vsedě, třída I), po práce fyzicky náročné (práce v zemědělství třída IIIb; práce v dolech,

třída V). Smyslem předpisu je především stanovit podmínky ochrany zdraví na pracovišti, k čemuž pomáhá souhrn limitů a omezení.

Větrání pracovišť

Množství vyměňovaného vzduchu se určuje s ohledem na vykonávanou práci a její fyzickou náročnost. Minimální dávka čerstvého vzduchu přiváděného na pracoviště pohybuje mezi 25 a 90 m³/hod/osobu dle třídy práce:

- **25 m³/h** na osobu pro práci převážně vsedě bez přítomnosti chemických látek, prachů nebo jiných zdrojů znečištění,
- **50 m³/h** na osobu pro práci převážně vsedě s přítomností chemických látek, prachů nebo jiných zdrojů znečištění,
- **70 m³/h** na osobu pro práci převážně vstoje a v chůzi,
- **90 m³/h** na osobu při těžké fyzické práci.

Zvýšení množství vzduchu je nutné například v místnostech, kde je povoleno kouření a to o 10 m³/h na osobu, dále také v pracovních prostorech s přístupem veřejnosti. Další požadavky předpisu podrobněji specifikují údržbu, provedení a provoz větracích systémů.

Tepelná pohoda pracoviště

V tab. 3 jsou uvedeny přípustné mikroklimatické podmínky, které musí být dodrženy po celý rok při práci na pracovišti, na němž je k větrání použito kombinované nebo nucené větrání a na pracovišti s udržovanou teplotou jako technologickým požadavkem. Teplota t_o [°C] je teplota operativní, která je hodnotícím kritériem pro tepelnou pohodu v prostoru a kromě teploty vzduchu respektuje i střední radiační teplotu a proudění vzduchu. Teplota t_g [°C] je teplota ve výši hlavy. Teplotní rozmezí jsou opět odstupňována dle třídy práce. Společně s teplotou jsou zde i podmínky na rychlost proudění vzduchu v prostoru a relativní vlhkost.

Třída práce	q_m [W/m ²]	$t_{o,min}$ nebo $t_{g,min}$ [°C]	$t_{o,max}$ nebo $t_{g,max}$ [°C]	v_a [m.s ⁻¹]	Rh [%]
I	≤80	20	27	0,01 až 0,2	30 až 70
IIa	81 až 105	18	26		
IIb	106 až 130	14	32	0,05 až 0,3	
III	131 až 160	10	30	0,1 až 0,5	
III	161 až 200	10	26		
IVa	201 až 250	10	24		
IVb	251 až 300	10	20		
V	301 a více	10	20		

Tab. 3: Přípustné denní hodnoty mikroklimatických podmínek na pracovišti dle předpisu č. 361/2007 Sb

Vysvětlivky: $t_{o,min}$ je platná pro tepelný odpor oděvu 1 clo
 v_a je rychlost proudění vzduchu

$t_{o,max}$ je platná pro tepelný odpor 0,5 cl
Rh je relativní vlhkost vzduchu

Zcela samostatně jsou řešena klimatizovaná pracoviště, kde je klimatizace použita nikoli z důvodů technologických požadavků na prostředí, ale k zajištění optimální pohody prostředí.

Taková pracoviště jsou rozdělena do tří kategorií (A, B, C), podle požadované kvality prostředí a náročnosti vykonávané činnosti.

2.4 Použití vzduchotechniky v provozech

Jak již bylo uvedeno, v převážné většině budov i průmyslových stavbách je nutné dosažení jisté kvality vnitřního mikroklimatu. Hlavním požadavkem nemusí být jen řešení vedoucí k dosažení tepelné pohody pracovníky, ale, hlavně v průmyslových stavbách, také vytvoření optimálního mikroklimatu důležitého pro kvalitu výroby ve spojení s minimálními energetickými výdaji. Řešení tepelné pohody se stává sekundárním požadavkem, který však nelze úplně zanedbat. Úvodním krokem pro instalaci vzduchotechnického systému by měla být rozvaha o účelu, kterému má systém sloužit a v jakém typu objektu bude provozován.

2.4.2 Aplikace ve specifických průmyslových provozech

Některé druhy provozů kladou z technologických důvodů specifické požadavky na kvalitu mikroklimatu. Jedná se především o odvod tepla vznikajícího při výrobě. Literatura [11] dělí halové objekty, které představují nejčastější průmyslový prostor, do kategorií podle měrné tepelné zátěže od vnitřních zdrojů q [W/m^3]:

- **horké provozy** – haly s vysokou tepelnou zátěží ($q > 80 W/m^3$), nutnost celoročního odvedení velkého množství tepla nejčastěji přirozeným větráním (aerace), použití místního odsávání od horkých zdrojů, provozy hutního a energetického průmyslu (ocelárny, válcovny, slévárny, sklárny).
- **teplé provozy** – haly s vyšší tepelnou zátěží ($25 < q \leq 80 W/m^3$), vývin tepla nestačí na pokrytí tepelných ztrát objektu v zimních měsících.
- **chladné provozy** – haly s relativně malou tepelnou zátěží ($q \leq 25 W/m^3$), produkce tepla od vnitřních zdrojů je nízká a je nutné vytápění objektu, výrazný vliv venkovní zátěže během letních měsíců, výrobní a skladovací haly (montážní haly, opravny), uplatnění přirozeného i nuceného způsobu větrání, případně místního odsávání [11].

Dalšími specifickými provozy, které mají charakteristické požadavky na kvalitu mikroklimatu, jsou [11]:

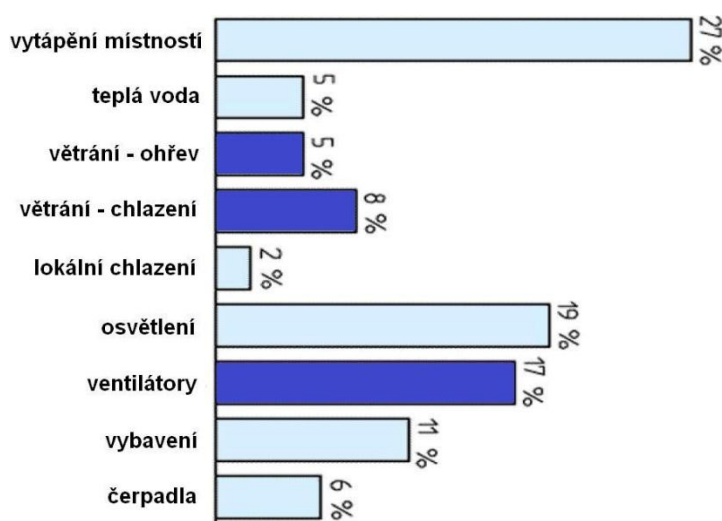
- **provozy s vývinem prachů, plynu a par** – prostory s lokálním vývinem koncentrovaných nečistot (kotelny, svařovny, lakovny), důraz na uplatnění místního odsávání jako technologické součásti pracoviště, automatické linky.
- **čisté provozy** – prostory s požadavky na nízkou koncentraci mechanických částic, vzniku vibrací a hluku (laboratoře, operační sály, výroba elektrotechnických a přesných strojních výrobků), pronikání částic z okolí často zamezeno vnitřním přetlakem místnosti, používání ochranného oblečení a pomůcek pro minimalizaci vzniku částic uvnitř, třístupňová filtrace venkovního vzduchu, oběhová dvoustupňová filtrace.
- **kuchyňské provozy** – nadměrná produkce tepla, vodních par a zplodin hoření odváděných nuceným větráním, používání lokálních digestoří pro odvod velmi znečištěného vzduchu (pachy, částice mastnoty, plynné kouřové zplodiny).

3 VZDUCHOTECHNIKA A ENERGETICKÉ HLEDISKO

Energetické náklady spojené s provozem větracích a klimatizačních zařízení jsou nedílnou součástí celkových energetických nákladů budovy. Dle požadavků na vnitřní prostředí budovy může růst složitost systému VZT a související provozní náklady, které kryjí spotřebu především:

- tepla,
- chladu,
- páry,
- elektrické energie,
- vody.

Podíl spotřeby energie připadajícího na větrání a klimatizaci se liší také podle druhu objektu, tedy zda se jedná o obytné, pracovní či společenské prostory. Obr. 5 například ukazuje, jak energeticky významnou součástí jsou ve studených klimatech systémy vzduchotechniky v administrativní budově, kde třetina spotřeby energií připadá právě na distribuci a úpravu vzduchu. S ohledem na neustálou modernizaci budov, která s sebou nese vyšší požadavky na stav vnitřního klimatu, se dá předpokládat, že poroste i energetická spotřeba nutná pro jeho tvorbu [12].

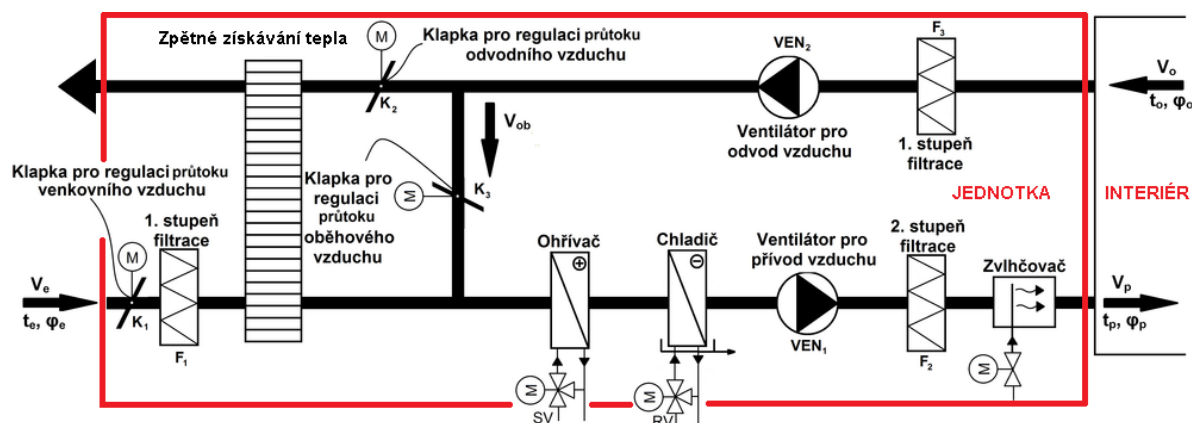


Obr. 5: Rozdělení typické spotřeby energie v administrativní budově [12]

3.1 Vzduchotechnická jednotka

Velmi rozšířeným typem větracího a klimatizačního zařízení je vzduchotechnická sestavná jednotka, na níž lze vysvětlit funkci dílčích zařízení, které se používají i v dalších vzduchotechnických systémech. Vzduchotechnická jednotka má stavebnicový charakter a jednotlivé komory lze kombinovat do různých sestav a sestavit tak jednotku pro větrání, teplovzdušné vytápění nebo klimatizaci [1]. V jednotlivých komorách probíhají termodynamické úpravy vzduchu (chlazení, ohřev, vlhčení, odvlhčování) a další procesy (filtrace, směšování, tlumení hluku). Hlavními funkčními prvky jsou:

- klapky (směšovací, regulační),
- výústky pro přívod a odvod vzduchu,
- filtry,
- výměníky,
- ohřivače,
- chladiče,
- ventilátory,
- zvlhčovač,
- vzduchovody.



Obr. 6: Schéma modelu vzduchotechnické jednotky, upraveno dle [13]

Uvedená jednotka patří mezi jednoduktové, jednozónový klimatizační systém sloužící k úpravě vzduchu pro jeden prostor, který se vyznačuje stejným charakterem provozu a tepelné zátěže. Typickým představitelem jednozónových systémů je jednoduktvý systém s konstantním průtokem vzduchu používaný například pro klimatizaci shromažďovacích prostor (průmyslové a sportovní haly, koncertní sály, kina, divadla) [14]. Příklad klimatizační jednotky je uveden na obr. 7.

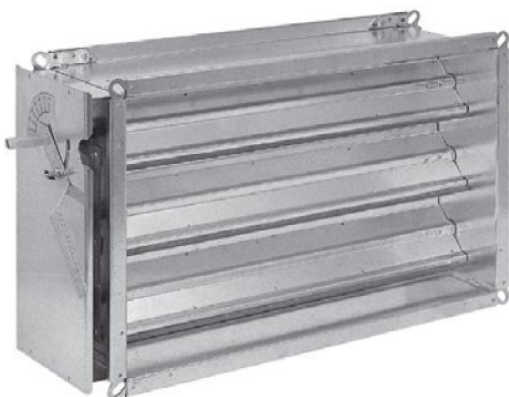


Obr. 7: Klimatizační jednotka REMAK Aeromaster XP [15]

3.1.1 Klapky

Jedná se o prvky sloužící zejména k regulaci či zamezení průtoku vzduchu. Klapky se vyskytují v každé vzduchotechnické jednotce a liší se svým konstrukčním provedením (čtyřhranné, kruhové) a počtem uzavíracích listů (jednolisté, vícelisté, žaluziové). Ovládání klapky je dle potřeby řešeno manuálně nebo servomotorem, při kterém je možné dálkové ovládání. Při elektronickém ovládání odebírají klapky elektrickou energii pro pohon motorů, v závislosti na úhlu otevření listů se mění tlaková ztráta klapky, která musí být vykompenzována zvýšeným výkonem ventilátoru. Dle účelu se klapky dělí na [3]:

- **Regulační klapky** jsou určeny pro plynulou regulaci objemového průtoku nebo v těsném provedení pro uzavření vzduchovodu. (viz obr. 8)
- **Samočinné klapky** se používají pro samočinné sání nebo výfuk vzduchu ale také pro vyrovnání tlaku mezi sousedními místnostmi. Zvláštním typem jsou zpětné klapky, které zamezují proudění vzduchu opačným směrem.
- **Požární klapky** (viz obr. 9) jsou používány jako bezpečnostní opatření a zamezují šíření požáru a zplodin hoření mezi prostory spojené vzduchovody. Tyto klapky obsahují kromě jiných typů ovládání (kouřové, centrální) i tepelně spouštěcí mechanismus.
- **Regulátory průtoku** - usměrňují průtok vzduchu na konstantní či proměnnou hodnotu.



Obr. 8: Vícelistá regulační klapka [16]

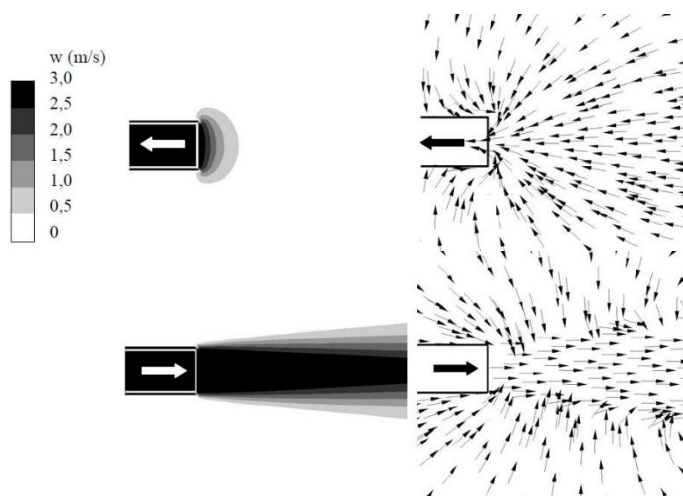


Obr. 9: Kruhová požární klapka [17]

3.2.2 Koncové prvky

Koncové komponenty se dělí na vnitřní a vnější a jsou určeny pro sání a přívod vzduchu. Koncové prvky vnitřní slouží pro rozptýlení vzduchu mísením, vytěšňováním nebo zaplavováním. Svým provedením formují proudění vzduchu vstupujícího do interiéru a ovlivňují šíření vzduchu v objektu, cílem zpravidla bývá vytvoření rovnoměrného rychlostního, teplotního a koncentračního pole (bez vzniku průvanů a teplotních kapes) [14]. Patří mezi ně vyústky (stropní, stěnové, podlahové, vířivé, štěrbinové, velkoplošné), anemostaty (obdélníkové, vířivé), dýzy a talířové ventily. Charakter proudů vzduchu z přívodních vyústí a proudů vzduchu odváděcích vyústí je výrazně odlišný (viz obr. 10) [14]. Provedení koncových

prvků ovlivňuje vhodnou distribuci upraveného vzduchu v interiéru, a může proto přispět k omezení nákladů na ohřev či chlazení vyměňovaného vzduchu.



Obr. 10: Proudění volného izotermního proudu odváděcího a přiváděcího otvoru (kontury a vektory rychlostí) [14]

3.2.3 Filtry

Čistoty vnitřního ovzduší je možno dosáhnout díky vícestupňové filtraci atmosférického vzduchu, při níž se odlučují tuhé či kapalné nežádoucí látky. Mechanické filtry jsou nedílnou součástí odsávacích i přiváděcích potrubí, které mohou být doplněny speciálními elektrickými filtry. Dle požadavků na kvalitu vnitřního prostředí lze používat [1]:

- filtry pro běžné větrání
 - hrubé (G1, G2, G3, G4, G5), účinné pro částice $> 10\mu\text{m}$
 - jemné (F5, F6, F7, F8, F9), účinné pro částice $> 1\mu\text{m}$ (viz obr. 11)
- vysokoúčinné filtry
 - HEPA (H10, H11, H12, H13, H14) účinné pro částice $> 0,01\mu\text{m}$ (viz obr. 12)
 - ULPA (U15, U16, U17), filtrování mikročástic

Třída filtrů se volí podle výskytu nečistot ve vzduchu, od velkých nečistot (hrubé filtry; vláknitý prach, pyly) přes jemnější nečistoty (jemné filtry; saze, kouř, bakterie) až k nečistotám okem neviditelných (vysokoúčinné filtry; aerosol, viry).

Účinnost filtrace závisí na použitém materiálu, charakteru znečištění a počtu stupňů filtrace. Tlaková ztráta filtru je ve srovnání s ostatními částmi větracích zařízení vysoká a zanášením se dále zvyšuje, čemuž musí být přizpůsoben výkon ventilátoru. Pro hrubé filtry se počáteční tlaková ztráta pohybuje mezi 10 – 70 Pa a konečná tlaková ztráta (po zanesení) mezi 80 – 300 Pa. Konečná tlaková ztráta u HEPA filtrů může dosahovat až 700 Pa [18].



Obr. 11: Kapsový filtr pro filtraci třídy F6 až F9 [19]



Obr. 12: Rámečkový HEPA filtr pro použití v čistých prostorech [20]

3.2.4 Ohřivače a chladiče

Jedná se o výměníky, ve kterých dochází k přenosu energie do upravovaného vzduchu. Přes teplosměnnou plochu výměníku probíhá ohřev, či chlazení, čímž se mění teplota dopravovaného vzduchu (obr. 13). Při chlazení se rozlišuje suché a mokré chlazení. Kondenzace při mokřém chlazení nastává v případě, kdy je povrchová teplota chladiče nižší než teplota rosného bodu upravovaného vzduchu.

V našich klimatických podmínkách jsou používány ohřivače pro ohřev přiváděného vzduchu v zimních a přechodných měsících. Na rozdíl od chladičů pracují s větším teplotním rozdílem mezi teplotou látky a vzduchem a tudíž je nutná menší teplosměnná plocha.

Podle druhu teplotní látky lze ohřivače a chladiče dělit [1]:

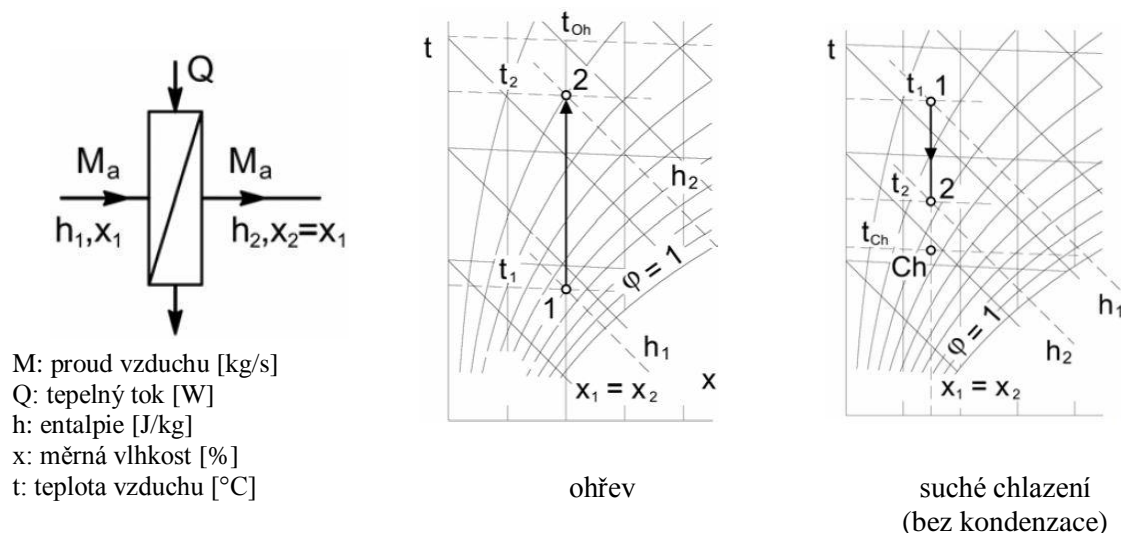
Ohřivače

- vodní
- parní
- elektrické
- chladivové (kondenzátory)
- hořáky (plynové, olejové)

Chladiče

- vodní
- chladivové (přímé výparníky)

Nejrozšířenější typem ohřevu je vodní ohřivač (výměník voda – vzduch) a v průmyslu jsou často využívány parní ohřivače. Elektrické ohřivače jsou využívány výjimečně či v havarijní funkci [1].



Obr. 13: Ohřev a chlazení vzduchu v h-x diagramu [1]

Z energetického hlediska představuje ohřev a chlazení vzduchu nejnáročnější proces. Pro omezení spotřeby je vhodné využití odpadního tepla (viz kap. 3.2.5) či snížení tepelných ztrát budovy.

3.2.5 Výměníky zpětného získávání tepla

Výměníky zpětného získávání tepla (ZZT) jsou instalovány přímo do potrubí nebo jsou součástí klimatizační, větrací jednotky. Jejich účelem je využít přímo nebo prostřednictvím teponosné látky odpadní teplo a zlepšit tak energetickou účinnost vzduchotechnického systému.

Před výměníky je třeba umístit filtry pro zamezení zanášení výměníků, které by způsobovalo postupné snižování přestupu tepla. Vřazení jakéhokoli výměníku do systému vzduchotechniky představuje nezanedbatelnou tlakovou ztrátu, která se může zvyšovat zmíněným zanášením či tvorbou námrazy. Účinnost zpětného získávání tepla závisí na velikosti teplosměnné plochy, tedy na velikosti zařízení. V případě použití více výměníků za sebou lze zvýšit účinnost, ovšem za cenu větších tlakových ztrát. Zvýšení součinitele přestupu tepla lze docílit úpravou teplosměnného povrchu či nárůstem rychlosti teplého vzduchu [21].

Základní dělení výměníků je [21]:

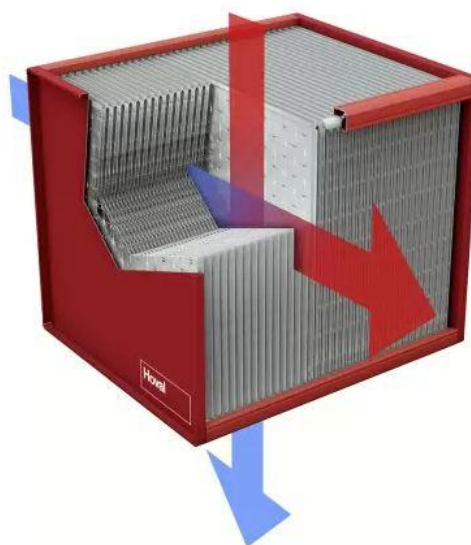
- rekuperační: přenos tepla přes stěnu výměníků,
 - deskové (obr. 15)
 - trubkové
- regenerační: přenos tepla přes akumulační hmotu,
 - rotační (obr. 14)
 - přepínací
- s pomocnou tekutinou.

Deskové výměníky jsou vhodné pro zařízení s menším průtokem vzduchu, např. pro malé provozovny. Trubkové výměníky jsou díky snadnějšímu čištění vhodné pro provoz s technologickým odvodem znečištěného vzduchu či spalin. Díky přenosu vázaného tepla jsou

rotační výměníky vhodné pro větší provozy, kde však lze akceptovat eventuální riziko přenosu škodlivin mezi proudy přiváděného a odváděného vzduchu (pachy, zárodky plísní, olej).



Obr. 14: Rotační výměník tepla pro použití ve vzduchotechnice s proplachovací komorou [22]



Obr. 15: Deskový výměník tepla s křížovým prouděním [22]

3.2.6 Ventilátory

Ventilátor představuje rotační lopatkový stroj, který zajišťuje dodání energie pro dopravu proudícího vzduchu. Úkolem ventilátoru je zajistit dostatečný tlakový spád, kryjící tlakové ztráty všech součástí vzduchotechnické jednotky včetně vzduchovodů. Pro pohon výkonných ventilátorů se využívají nejčastěji třífázové asynchronní motory, při menších výkonech i jednofázové.

Ventilátory lze rozdělit podle směru průtoku vzduchu:

- axiální, vzduch proudí ve směru osy oběžného kola,
- radiální, výtlač vzduchu ve směru kolmém na osu rotace, (obr. 16)
- diagonální, výtlač pod úhlem menším než 90° .

Další dělení je u radiálních ventilátorů podle celkového dopravního tlaku na nízkotlaké ($\Delta p < 1000 \text{ Pa}$), středotlaké ($1000 \text{ Pa} < \Delta p \leq 3000 \text{ Pa}$) a vysokotlaké ($\Delta p > 3000 \text{ Pa}$). Axiální ventilátory se dělí na rovnotlaké nebo přetlakové, u nichž je statický tlak za oběžným kolem vyšší než před ním.

Při provozu ventilátoru je vhodné regulovat množství dopravovaného vzduchu. Nejčastějšími možnostmi regulace jsou:

- Regulace škrcením, při níž se např. klapkou zvyšuje odpor potrubí a mění průtok vzduchu. Jedná se o ztrátovou regulaci, proto se využívá jako krátkodobé řešení nebo pro malé výkony.

- Regulace změnou otáček je díky své hospodárnosti nejčastější variantou regulace. Změnou napájecího napětí či kmitočtu u poháněného motoru ventilátoru lze regulovat množství dopravovaného vzduchu. Pro tento typ regulace se kromě frekvenčních měničů používají i elektricky komutované (EC) motory s plynulou regulací v celém svém rozsahu.
- Regulace natáčením lopatek představuje nejnáročnější typ regulace, který se používá pro větší průtoky vzduchu.



Obr. 16: Radiální vysokotlaký ventilátor [23]



Obr. 17: Axiální středotlaký požární ventilátor [24]

3.2.7 Vzduchovody

Pro distribuci vzduchu v objektu slouží široké spektrum kruhových či hranatých vzduchovodů, skládajících se z rovných částí a tvarovek. Kruhové potrubí není tak náchylné na zanášení z důvodu nepřítomnosti hran, stejně tak akustický hluk se projevuje v menší míře než u čtyřhranného vzduchovodu.

Vzduchovody se vyrábějí z celé řady materiálů, nejrozšířenější je použití pozinkovaného plechu ve formě tabulí pro čtyřhranné, či spirálně vinutého pro kruhové potrubí. Plastové potrubí je vhodné pro dopravu agresivních příměsí, zatímco zděné potrubí pro znečištěný odpadní vzduch. Další materiály se používají pro specifitější nároky, např. silikátové hmoty pro ochranu před požárem, hliníková folie pro výrobu speciálních pěnových ohebných hadic ALP nebo textilní potrubí pro plynulou distribuci vzduchu v halových objektech [3].

3.3 Energetická spotřeba jednotky

Větrací a klimatizační jednotky jsou významným spotřebičem energie. Dodaná energie v moderních jednotkách je využívána především na tyto energetické procesy spojené s úpravami vzduchu:

- ohřev přiváděného větracího vzduchu, případně teplovzdušné vytápění,

- ochlazování přiváděného větracího vzduchu, odvlhčování pomocí chlazení,
- doprava vzduchu ventilátory,
- pohon kompresorů, čerpadel a ostatních elektrických spotřebičů (parní vyvíječ).

Jednotlivé části vzduchotechnické jednotky (viz kap. 3.2) ovlivňují výslednou energetickou spotřebu. Nejvýznamnějšími spotřebiči jsou ohřivače a chladiče vzduchu, ve kterých je však spotřeba daná požadavkem vnitřního prostředí budovy. Z elektrických spotřebičů jsou nejvýznamnějšími odběrateli energie ventilátory, případně oběhová čerpadla a kompresory. Spotřeba elektrické energie pro měření a regulaci (servomotory, čidla) je v porovnání s ostatními aparáty zanedbatelná. Energetickým hodnocením vzduchotechnických jednotek se zabývá např. metodika dle EUROVENT [25], v níž jsou zavedeny tzv. třídy energetické účinnosti, zohledňující mimo jiné i vliv zpětného získávání tepla.

Z hlediska zaměření diplomové práce je stěžejní energetická spotřeba spojená s dopravou vzduchu, která může být významně snížena minimalizací tlakových ztrát. Vzhledem k podílu tlakových ztrát jednotlivých částí vzduchotechnického zařízení (viz tab. 4) představuje distribuce vzduchu vzduchovody významnou oblast možných úspor.

VZT jednotka	filtry kapsové	230 – 420 Pa
	rotační tepelný výměník	90 – 250 Pa
	ohřivač	40 – 120 Pa
	chladič	60 – 140 Pa
	zvlhčovač	20 – 60 Pa
	CELKEM	440 – 990 Pa
Distribuce vzduchu	potrubní vedení	110 – 450 Pa
	distribuční prvky	20 – 70 Pa
	odsávací nástavec	175 Pa
	sací komora	30 – 100 Pa
	CELKEM	335 – 795 Pa

Tab. 4: Empirické hodnoty tlakové ztráty komponent pro velké budovy [26]

3.3.1 Energetické hodnocení náročnosti dopravy vzduchu

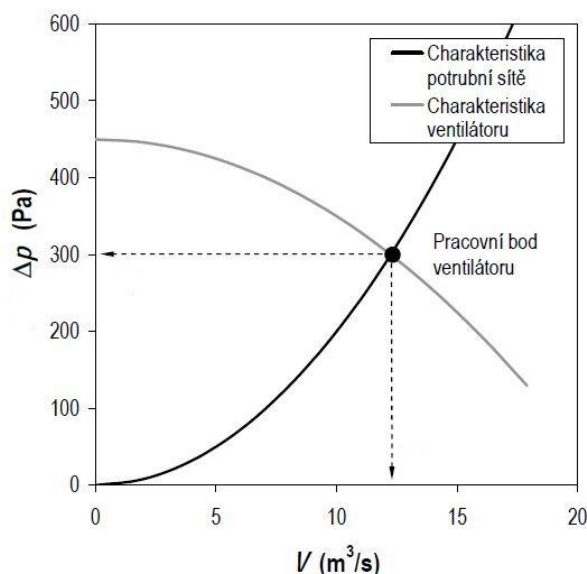
Ventilátor dodávající potřebný tlak do potrubní sítě představuje spotřebič elektrické energie, která je využita pro dopravu vzduchu. Ventilátor musí zajistit průtok vzduchu potrubní sítí, který se vytváří díky celkovému dopravnímu tlaku Δp .

Celková spotřeba závisí na průtoku vzduchu, délce provozu, účinnosti vzduchotechnického systému a především na tlakových ztrátách přítomných v potrubní sítí. Tlakovým poměrům a ztrátám je věnována podrobněji kapitola 4.

Vlastnosti ventilátoru

Parametry charakterizující ventilátor jsou především celkový dopravní tlak Δp [Pa], výkon P [W], příkon P_p [W], účinnost η_{tot} a objemový průtok ventilátoru V [m³/s]. Dynamické vlastnosti jsou zaznamenány v charakteristice ventilátoru, tj. závislosti charakteristických veličin zpravidla na objemovém průtoku vzduchu. Sestrojením tlakové charakteristiky ventilátoru a

potrubí lze graficky zjistit tzv. pracovní bod, který určuje dopravní tlak ventilátoru a průtok v daném potrubí (viz obr. 18).



Obr. 18: Pracovní bod ventilátoru stanovený pomocí tlakových charakteristik [21]

Výkon ventilátoru je určen průtokem vzduchu a celkovým dopravním tlakem.

$$P = V \cdot \Delta p \quad [W] \quad (3.1)$$

kde: V : objemový průtok vzduchu [m^3/s]

Δp : celkový dopravní tlak ventilátoru [Pa]

Příkon ventilátoru se stanoví z výkonu ventilátoru P a celkové účinnosti η_{tot} , která je definovaná jako poměr mezi výkonem a příkonem ventilátoru a představuje podíl dodávané elektrické energie, který se využije pro dopravní tlak ve ventilátorech. Zahrnuje v sobě dílčí účinnosti: účinnosti motoru η_{motor} , přenosu energie $\eta_{přenos}$ (řemen, ložiska) a aerodynamickou účinnost ventilátoru η_{vent} .

$$P_p = \frac{P}{\eta_{tot}} = \frac{V \Delta p}{\eta_{tot}} \quad [W] \quad (3.2)$$

kde: η_{tot} : celková účinnost [-]

Dle vztahu 3.2 je zřejmé, že nízkého příkonu ventilátoru lze dosáhnout několika způsoby:

- zvýšením celkové účinnosti přeměny elektrické energie,
- snížením dopravního tlaku, tedy snížením tlakových ztrát v potrubní síti,
- snížením objemu proudícího vzduchu vhodným dimenzováním větrání.

Měrný příkon ventilátoru SFP je parametrem hodnotící energetickou náročnost dopravy vzduchu ve vzduchotechnické jednotce (specific fan power). Tento ukazatel elektrické energie

potřebné pro pohon ventilátoru je vztažen na množství proudícího vzduchu a zohledňuje spotřebu jednotlivého ventilátoru nebo celé skupiny ventilátorů.

$$SFP = \frac{\Sigma P_p}{q_v} \quad [W/(m^3/s)] \quad (3.3)$$

kde ΣP_p : součet příkonů všech ventilátorů [W]
 q_v : celkové množství proudícího vzduchu [m^3/s]

pro jediný ventilátor platí

$$SFP = \frac{\Delta p}{\eta_{tot}} \quad [W/(m^3/s)] \quad (3.4)$$

Měrný příkon ventilátoru lze vyjádřit v ekvivalentních jednotkách:

$$[SFP] = \frac{W}{m^3/s} = \frac{J}{m^3} = Pa$$

Výpočtový vztah je podrobněji uvedený v normě ČSN EN 13779, ve které se měrný příkon dále klasifikuje do 7 tříd, SFP1 až SFP 7 dle velikosti, přičemž rozdíl je téměř desetinásobný (viz tab. 5). Jsou také uvedeny detailní specifikace doplňujících ukazatelů SFP_E a SFP_V , umožňující vyhodnocení efektivity při návrhových parametrech tlakových ztrát či ověření během projektové části nebo zkušebního provozu.

Třída	Hodnota SFP [$W/(m^3/s)$]
SFP 1	< 500
SFP 2	500 – 750
SFP 3	750 – 1250
SFP 4	1250 – 2000
SFP 5	2000 – 3000
SFP 6	3000 – 4500
SFP 7	> 4500

Tab. 5: Klasifikace měrného příkonu ventilátoru dle ČSN EN 13779

Měrný příkon ventilátoru umožňuje porovnávat jednotlivé ventilátory či celé vzduchotechnické jednotky a je jedním z parametrů při hodnocení energetické náročnosti budov dle vyhlášky č. 78/2013 Sb. na jejímž základě je udělován průkaz energetické náročnosti budov.

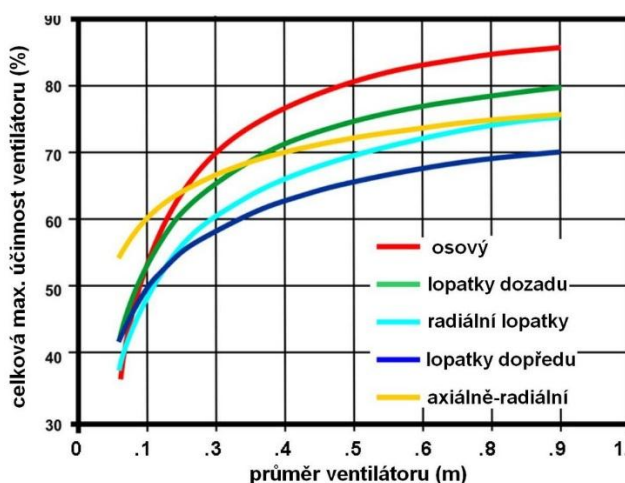
3.3.2 Možnosti snižování energetické spotřeby dopravy vzduchu

Pro snížení energetické spotřeby vzduchotechnické jednotky se naskýtá několik variant:

- **Vhodné dimenzování větrání:** Množství dodávaného vzduchu do prostoru je zásadním kritériem určujícím výkon ventilačního zařízení. Pokud klesnou nároky na dopravované množství vzduchu, změní se i požadavky na ventilátor. V průmyslové praxi je již obvyklé použití frekvenčních měničů, které umožňují plynulou regulaci otáček ventilátoru a tím i celkového průtoku. Množství vyměňovaného vzduchu je voleno na základě velikosti objektu, informací o koncentraci škodlivin (především koncentrace CO_2), počtu lidí a technologických potřebách. Dodržováním doporučených průtoků se

zamezí předimenzování větracího zařízení. Účinným prostředkem snížení množství vzduchu je také přerušované větrání, tj. časově omezené větrání (např. v závislosti na počtu lidí, výskytu škodlivin).

- **Snížení odporu proudění v rozvodech:** Tlakové ztráty způsobené v potrubích, sacích a výtlačných hrdlech mají za následek zvětšení dopravního tlaku ventilátoru. Vhodný návrh potrubní sítě, který respektuje plynulost toku, je předpokladem pro snížení vlivu tlakových ztrát. Doporučení pro návrh sacích a výtlačných hrdel je podrobně vysvětleno v [27] a [28].
- **Optimalizace účinnosti ventilátoru:** Zvýší-li se účinnost zařízení, klesne požadovaný příkon pro jeho provoz. Účinnost motoru lze zvýšit vhodnější konstrukcí a zatížením na jmenovitý výkon, účinnost přenosu energie (řemen, ložiska) např. volbou jiného typu řemenu, či pohonem napřímo. Poslední dílčí účinností je samotná aerodynamická účinnost ventilátoru, která je daná typem ventilátoru (radiální, axiální, diagonální), typem lopatek (dopředu, dozadu ohnuté, radiální), a také velikostí ventilátoru, neboť větší ventilátory mají vyšší účinnost než ty malé, protože ztráty nenarůstají lineárně s velikostí. Vliv mechanických a objemových ztrát a viskózních sil je větší u malých ventilátorů. [27]. Závislosti účinnosti jednotlivých typů ventilátorů zobrazuje obr. 19.



Obr. 19: Křivky maximální účinnosti ventilátorů [27]

Při provozu ventilátoru se mění účinnost v závislosti na objemovém průtoku vzduchu. Největší účinnosti dosahuje ventilátor v horní části svého rozsahu, ve které by měl být převážně provozován. Účinnost větrání také závisí na vzduchotěsnosti potrubí. Nedostatečná vzduchotěsnost způsobuje úniky, jež mají mimo jiné za následek zvýšení požadavků na celkový objem dopravovaného vzduchu.

3.3.3 Snížování energetické náročnosti vzduchotechnických systémů

- **Recyklace odpadního tepla či předehřev vzduchu solárním nebo zemním výměníkem:** Ohřátý vzduch představuje v chladných měsících tepelné ztráty, jež je možné využít pro předehřev chladného vzduchu, který vstupuje do objektu. Zvyšování účinnosti zpětného získávání tepla lze snížit nároky na dodávku tepla a tím i

energetickou náročnost vzduchotechnické jednotky. Přívodem chladného venkovního vzduchu v chladných měsících se zvětšuje množství tepla, jež musí být do vzduchu dodáno. Naopak v teplých měsících se zvyšuje potřeba chlazení přiváděného vzduchu. Využitím některého z obnovitelných zdrojů lze snížit dodávku energie pro zařízení úpravy vzduchu (ohřívače, chladiče) [29].

- **Údržba a pravidelné čištění:** Provozem se jednotlivé části vzduchotechniky (výměníky, zvlhčovače, vzduchovody) znečišťují, což může vést ke zvyšování spotřeby energie. Zanesená teplosměnná plocha výměníků zmenšuje tepelný výkon pro ohřev vzduchu. Zmenšení průtočného průřezu vzduchovodů spolu se zanesením ventilátoru vede ke zvýšení tlakové ztráty, což se při zachování průtoku projeví ve spotřebě ventilátoru. Pravidelné čištění umožňuje eliminovat tyto energetické ztráty a zlepšit účinnost celého ventilačního systému.

4 PROUDĚNÍ VZDUCHU V POTRUBÍ

Pro hlubší pochopení tlakových ztrát ve VZT potrubích a analýzu možností jejich snižování je důležité připomenout teoretické základy spojené s prouděním tekutin.

Vzduch proudící ve vzduchotechnických potrubích je stlačitelná tekutina. Pro výpočty však lze tuto stlačitelnost zanedbat a uplatit základní zákony, kterými jsou:

- stavová rovnice,
- rovnice kontinuity,
- energetické rovnice.

Mezi základní vlastnosti vzduchu patří hustota, tlak a teplota vzduchu. Vztah těchto veličin udává stavová rovnice ve tvaru:

$$p \cdot \frac{1}{\rho} = r \cdot T \quad (4.1)$$

kde: p : tlak vzduchu [Pa]
 ρ : hustota [kg/m^3]
 r : měrná plynová konstanta [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]
 T : teplota vzduchu [K]

Pro proudění reálné tekutiny (vzduchu) v potrubí je charakteristické působení vnitřního tření způsobeného vazkostí vzduchu. Tekutina se při proudění v prostoru chová tak, že se po sobě posouvají její pomyslné vrstvy [30]. Tomuto posouvání klade tekutina odpor právě vlivem vnitřního tření. Tečné napětí (τ) je závislé na rozdílu rychlostí těchto vrstev a fyzikálních vlastnostech tekutiny a lze ho vyjádřit vztahem:

$$\tau = \mu \cdot \frac{dv}{dy} \quad [\text{Pa}] \quad (4.2)$$

kde: μ : součinitel dynamické viskozity [Pa s]
 $\frac{dv}{dy}$: gradient rychlosti [$\text{m s}^{-1}/\text{m}$]

Pro praktické výpočty se používá kinematická viskozita ν , která je poměrem dynamické viskozity a hustoty:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (4.3)$$

Dynamická viskozita stoupá s rostoucí teplotou. Hodnoty dynamické viskozity atmosférického vzduchu (tlak 101 325 Pa, teplota 20°C) a kinematické viskozity při uvažované hustotě 1,2 kg/m^3 jsou:

$$\mu = 1,83 \cdot 10^{-6} \text{ Pa s}$$

$$\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity vyjadřuje zákon zachování hmotnosti při proudění tekutiny proudovou trubicí. Hmotnostní průtok tekutiny Q_v je v každém průřezu potrubí stejný, neboli:

$$Q_{v1} = Q_{v2} = \text{konst} \quad [\text{kg/s}] \quad (4.4)$$

$$v_1 \cdot \rho_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot \rho_2 \cdot S_2 = \text{konst} \quad (4.5)$$

Rovnice 4.5 platí obecně pro dokonalou i vazkou tekutinu za předpokladu, že hmota je stálá [30]. Ze vztahu 4.5 je patrné, že rychlost pohybu proudu je nepřímo úměrná ploše příčného průřezu potrubí.

Energetická rovnice

Energetická rovnice vyjadřuje zákon o zachování energie proudící tekutiny. Pro reálné tekutiny se používá rozšířená verze tzv. Bernoulliho rovnice, dle které se součet polohové, tlakové a kinetické energie na počátečním průřezu rovná koncovému průřezu navýšeného o tlakové ztráty vyvolané vnitřním třením.

$$p_1 + h_1 \rho_1 g + \frac{\rho_1}{2} v_1^2 = p_2 + h_2 \rho_2 g + \frac{\rho_2}{2} v_2^2 + p_z \quad (4.6)$$

kde: p_1, p_2 jsou statické tlaky na počátečním a koncovém průřezu [Pa]

$h_1 \rho_1 g, h_2 \rho_2 g$ jsou polohové tlaky na počátečním a konečném průřezu [Pa]

$\frac{\rho_1}{2} v_1^2, \frac{\rho_2}{2} v_2^2$ jsou dynamické tlaky na počátečním a konečném průřezu [Pa]

p_z je tlaková ztráta vyvolána vnitřním třením při proudění [Pa]

4.1 Charakter proudění

Při proudění reálné tekutiny se vyskytují dva základní druhy proudění [31]:

- **laminární proudění:** Jednotlivé částice tekutiny se pohybují v rovnoběžných vrstvách a nesměšují se s částicemi vrstev sousedních.
- **turbulentní:** Jednotlivé částice konají nejen pohyb ve směru proudu, ale i vlastní podružné pohyby všemi směry, čímž se pomyslné vrstvy směšují.

Mezi základními režimy proudění se vyskytuje úzká oblast, tzv. přechodného proudění, při němž laminární proudění přechází v turbulentní a naopak.

Charakter proudění udává Reynoldsovo číslo, které vyjadřuje vliv vnitřního tření v důsledku viskozity dané tekutiny při proudění. Je to poměr dynamických sil k silám viskózním.

$$\text{Re} = \frac{v_s \cdot D_h}{\nu} \quad [-] \quad (4.7)$$

kde: v_s : střední rychlost v profilu [m/s]

D_h : hydraulický průměr charakterizující průtočný průřez [m]

ν : součinitel kinematické viskozity [m^2/s]

Hydraulický průměr je charakteristický rozměr průtočného profilu, který se určuje i pro obecný (ne kruhový) profil. Je definován poměrem čtyřnásobku vnitřního průřezu daného potrubí a jeho smáčeného obvodu.

$$D_h = \frac{4S}{O} \quad [\text{m}] \quad (4.8)$$

kde: S : plocha průtočného průřezu [m^2]

O : smáčený obvod [m]

Pro kruhový průřez potrubí se hydraulický průměr D_h rovná geometrickému průměru d .

Laminární proudění se v kruhovém potrubí vyskytuje do mezní hodnoty Reynoldsova čísla $Re_{\text{krit}} = 2320$. V rozmezí $2320 < Re < 3000$ se jedná o přechodovou oblast mezi laminárním a turbulentním prouděním. Nad hodnotu 3000 se jedná o rozvinuté turbulentní proudění, které se ve vzduchovodech sloužících pro větrání převážně vyskytuje [21].

Rychlostní profil při laminárním proudění má parabolický tvar (viz obr. 20). Při turbulentním proudění lze rychlostní profil vyjádřit dle vzorce 4.9.

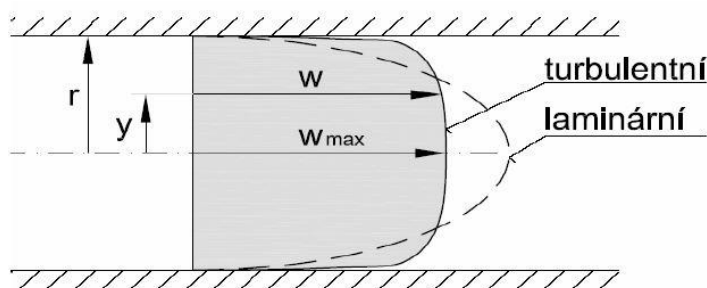
$$v = v_{\text{max}} \left(1 - \frac{y}{r}\right)^{1/n} \quad (4.9)$$

kde: v_{max} : maximální rychlost v ose [m/s]

n : exponent závislý na Re [-]

r : poloměr potrubí [m]

y : vzdálenost od osy potrubí [m]



Obr. 20: Rychlostní profil laminárního a turbulentního proudění [21]

Jak už bylo zmíněno, ve vzduchotechnických potrubích se lze setkat převážně s rozvinutým turbulentním prouděním. Doporučené rychlosti v různých oblastech včetně průmyslových aplikací se při uvážení rozměrů potrubí pohybují v oblasti turbulentního proudění (viz tab. 6). Jako příklad je uveden výpočet Reynoldsova čísla v kruhovém vzduchovodu o průměru DN300 v něm se dopravovaný vzduch pohybuje rychlostí 3 m/s při teplotě 20°C a kinematické viskozitě $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

$$v = 3 \text{ m/s}$$

$$d = 0,3 \text{ m}$$

$$\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Re = (3 \cdot 0,3) / 1,5 \cdot 10^{-5} = 60\,000 > 2320 \text{ turbulentní režim}$$

druh budovy	obytná	veřejná	průmyslová
pátevní rozvody	3,5 – 5 m/s	5 – 7 m/s	6 – 9 m/s
vedlejší větve	3 m/s	3 – 4,5 m/s	4 – 5 m/s

Tab. 6: Doporučené rychlosti proudění ve vzduchovodech podle typu objektu a umístění [14]

4.2 Tlakové ztráty

Při laminárním i turbulentním proudění viskózních tekutin potrubím vznikají v potrubí tlakové ztráty, které je možno rozdělit do dvou skupin:

- délkové ztráty třením,
- místní ztráty vřazenými odpory.

Tyto ztráty se projeví poklesem statického tlaku. Při proudění vzduchu větracími kanály se zpravidla vyskytují oba druhy ztrát. O jejich vzájemném poměru rozhoduje především složitost potrubní sítě (délka, větvení), množství vřazených odporů (zúžení, rozšíření, odbočky, ohyby), rozměry potrubí a průtočná rychlost, neboť oba druhy ztrát jsou kvadraticky úměrné právě s rychlostí tekutiny.

4.2.1 Délkové ztráty třením

Délkové ztráty Δp_{tr} vznikají vlivem viskozity tekutiny a způsobují úbytek tlaku. Velikost ztrát se stanoví pomocí Weisbachova vztahu:

$$\Delta p_{\text{tr}} = \lambda \frac{l}{D_h} \frac{v^2}{2} \rho \quad [\text{Pa}] \quad (4.10)$$

kde: λ : součinitel třecích ztrát [-]

l : délka potrubí [m]

D_h : hydraulický průměr potrubí [m]

v : průměrná rychlost v potrubí [m/s]

ρ : hustota tekutiny [kg/m³]

Součinitel třecích ztrát závisí na Reynoldsově čísle a na drsnosti stěn potrubí. Při laminárním proudění, tedy pro případy $Re < Re_{\text{krit}}$, je součinitel závislý pouze na Reynoldsově čísle

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (4.11)$$

Při turbulentním proudění lze pomocí kriterijního diagramu [32, s. 105] rozlišit tři režimy turbulentního proudění [32], v nichž se liší určení součinitele třecích ztrát.

- proudění v hydraulicky hladkém potrubí, při kterém je tření závislé pouze na Reynoldsově čísle [$\lambda=f(Re)$],

- proudění v přechodové oblasti, kde je tření závislé na Reynoldsově čísle i na relativní drsnosti [$\lambda=f(\text{Re},k_r)$],
- proudění v hydraulicky drsném potrubí, při kterém je tření závislé pouze na relativní drsnosti [$\lambda=f(k_r)$].

Relativní drsnost potrubí je definována jako poměr absolutní drsnosti k [mm] a již známého hydraulického průměru D_h

$$k_r = \frac{k}{D_h} \quad [-] \quad (4.12)$$

Pro přesnost jsou v Tab. 7 uvedeny absolutní drsnosti stěn pro různé materiály vzduchovodů.

Provedení vzduchovodu	k [mm]
pozinkovaný plech	0,15
betonový kanál, hladký povrch	0,5
betonový kanál, hrubý povrch	1 – 3
potrubí z plastu	0,007

Tab. 7: Absolutní drsnosti stěn vzduchovodů [14]

Pro vyčíslení hodnoty součinitele třecích ztrát v jednotlivých režimech proudění existuje v odborné literatuře mnoho vztahů, zde jsou uvedeny některé z nich. Neexistuje univerzálně platný vztah, který by byl použitelný pro libovolnou rychlost tekutiny, drsnost a materiál potrubí. Přesností vztahů se podrobněji zabývá např. [33].

- vztah dle Blasiusa pro hydraulicky hladké potrubí,

$$\lambda = 0,3164 \text{Re}^{-0,25} \quad (4.13)$$

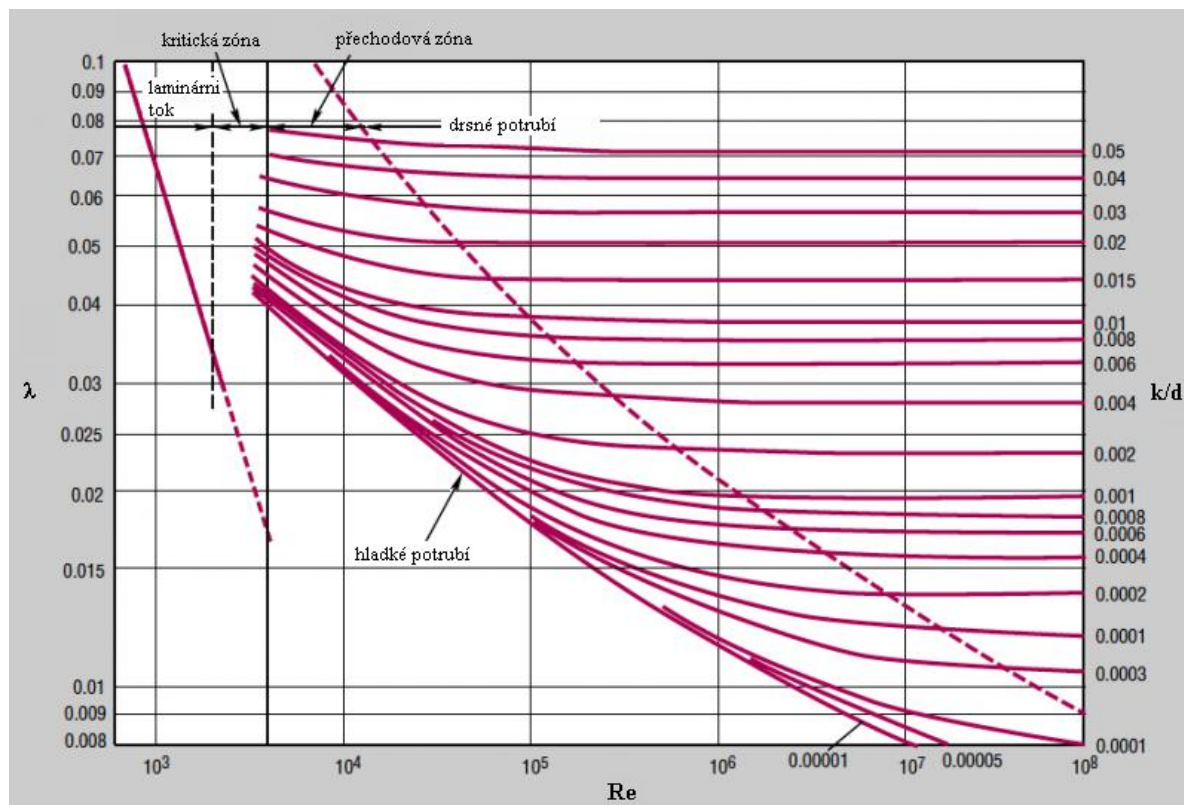
- vztah dle Al'tšula pro přechodovou oblast turbulentního proudění,

$$\lambda = \left[-1,8 \log \left(\frac{k_r}{10} + \frac{7}{\text{Re}} \right) \right]^{-2} \quad (4.14)$$

- vztah dle Nikuradse pro oblast hydraulicky drsného potrubí.

$$\lambda = \left[1,14 + 2 \log \left(\frac{1}{k_r} \right) \right]^{-2} \quad (4.15)$$

Druhý způsob určení součinitele třecích ztrát spočívá v grafickém určení z tzv. Moodyho diagramu (obr. 21), ve kterém je názorně vidět průběh součinitele třecích ztrát λ závislého na Reynoldsově čísle Re a relativní drsnosti k_r při proudění v potrubí kruhového průřezu. Určení grafickou cestou není tak přesné jako početním způsobem, ale v praxi se běžně používá.



Obr. 21: Moodyho diagram, upraveno dle [34]

4.2.2 Tlakové ztráty místní

Při proudění tekutiny tvarovými částmi potrubí dochází ke změně velikosti i směru rychlosti proudění. Následkem toho vznikají lokální víry, případně se odtrhává proud tekutiny od stěny. Uvedená změna rychlostního profilu způsobuje úbytek kinetické energie, která se projeví místní tlakovou ztrátou Δp_{zm} [35].

Místní tlakové ztráty vznikají v tvarových prvcích vzduchovodů, zejména v částech měnících svůj profil v průřezu (přechody, konfuzory, difusory), sacích a výfukových otvorech, prvcích měnících směr proudění (oblouky, kolena), v klapkách a clonách, odbočkám a tvarovkám při dělení proudu.

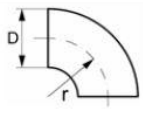
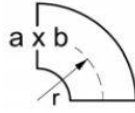
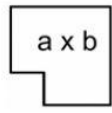
Místní tlaková ztráta se určuje podobně jako délková ztráta ovšem za pomocí součinitele místní ztráty.

$$\Delta p_{zm} = \zeta \frac{v^2}{2} \rho \quad [\text{Pa}] \quad (4.16)$$

kde: ζ : součinitel místní ztráty [-]
 v : průměrná rychlost v potrubí [m/s]
 ρ : hustota tekutiny [kg/m³]

Součinitel místní ztráty je pro jednotlivé lokální změny určován převážně experimentálně, či za pomoci počítačové simulace. Pro typické prvky používané ve vzduchotechnice jsou uvedeny

hodnoty na obr. 25. Pro hodnoty $Re > 10^4 - 10^5$ je závislost součinitele místní ztráty konstantní. V oblasti laminárního proudění je závislost klesající [14].

 Oblouk 90 °, kruhový průřez D , $r/D = 1,5$					
D (mm)	100	125	180	200	250
ζ (-)	0,21	0,16	0,12	0,11	0,11
 Oblouk 90 °, průřez $a \times b$, $r/a = 1,5$					
a/b (-)	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0
ζ (-)	0,20	0,19	0,17	0,15	0,14
 Koleno ostré 90 °					
b/a (-)	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0
ζ (-)	1,27	1,23	1,18	1,13	1,07

Obr. 22: Součinitel místní ztráty pro vybrané tvarové prvky (22)

4.2.3 Celková tlaková ztráta v potrubí

Celkovou tlakovou ztrátou potrubí, v němž proudí konstantní průtok vzduchu lze vyjádřit za pomoci místní a délkové ztráty.

$$\Delta p_z = \left(\lambda \frac{l}{D_h} + \sum \zeta \right) \frac{v^2}{2} \rho \quad [\text{Pa}] \quad (4.17)$$

- kde:
- λ : součinitel třecích ztrát [-]
 - l : délka potrubí [m]
 - D_h : hydraulický průměr potrubí [m]
 - v : průměrná rychlost v potrubí [m/s]
 - ρ : hustota tekutiny [kg/m^3]
 - ζ : součinitel místní ztráty [-]

V jakémkoliv místě potrubí se celkový tlak p_c skládá s tlaku statického p_s a tlaku dynamického p_d . Dopravní tlak Δp , který poskytuje ventilátor, musí pokrýt tlakové ztráty Δp_z v sací i výtlačné části. Jinými slovy, dopravní tlak Δp je roven součtu tlakové ztráty celého potrubí a dynamického tlaku na výtlačku potrubí p_{d2} , jež udává rychlost výtoku. Uvedené tlakové poměry v potrubí jsou názorně zobrazeny na obr. 23.

$$\Delta p = p_{c2} - p_{c1} = \Delta p_{c1} + \Delta p_{c2} = \Delta p_{z1} + \Delta p_{z2} + p_{d2} \quad [\text{Pa}] \quad (4.18)$$

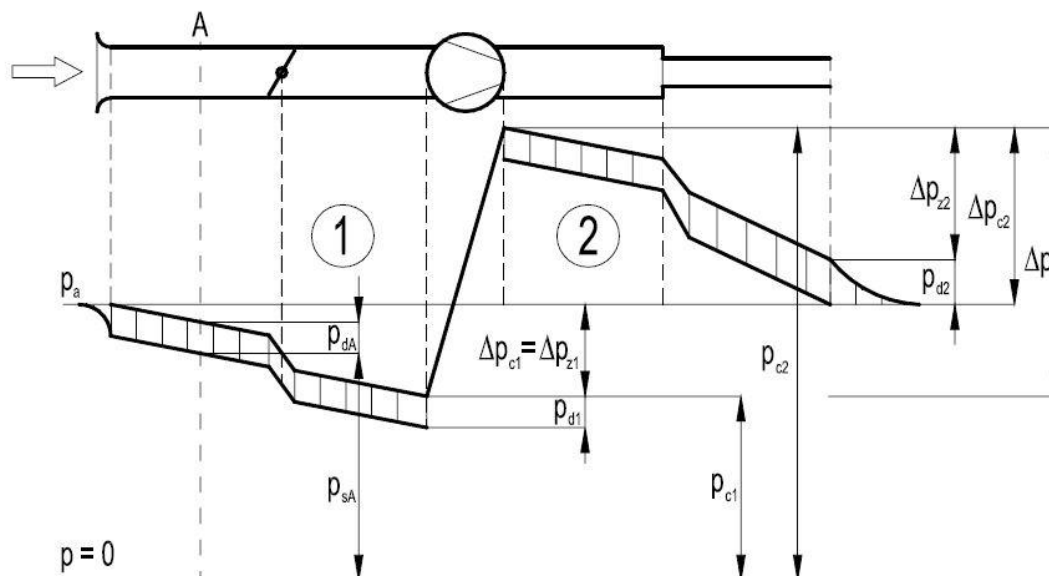
- kde: Δp : dopravní tlak ventilátoru [Pa]

p_{c2} , p_{c1} : celkové (absolutní) tlaky před a za ventilátorem [Pa]

Δp_{c1} , Δp_{c2} : změna celkových tlaků v sací a výtlačné části [Pa]

Δp_{z1} , Δp_{z2} : tlakové ztráty v sací a výtlačné části [Pa]

p_{d2} : dynamický tlak na konci potrubí [Pa]



Obr. 23: Tlakové poměry v potrubí s ventilátorem [21]

5 ZANÁŠENÍ A ČIŠTĚNÍ VENTILAČNÍCH SYSTÉMŮ

Ve ventilačních a klimatizačních systémech může docházet při instalaci a během provozu k tvorbě nánosů prachu a jiných nečistot. Tyto nánosy vznikají na vnitřních stěnách jednotlivých zařízení. Znečištění probíhá v nově postavených objektech již při stavbě a provozem se může dále rozšiřovat [36]. Rizika spojená se zanášením vzduchotechniky se projevují v oblasti hygienické bezpečnosti a požární bezpečnosti a mají vliv i na provozní náklady. Kontaminace ventilačních systémů může mít tyto následky [37]:

- zdravotní rizika pro uživatele objektu při výskytu mikrobiologické kontaminace,
- prach vstupující do objektu z ventilačního systému,
- zvýšení tlakové ztráty a nároků na dopravu vzduchu,
- snížení požární bezpečnosti ucpaním tlumiče požáru,
- zvýšení pravděpodobnosti požáru při kontaminaci vznětlivými látkami,
- infekční riziko v nemocnicích.

Vzhledem k zaměření práce se další rozbor zaměří především na zvýšení tlakové ztráty v důsledku zanášení nečistotami.

Byla provedena rešerše odborné literatury, která ukázala, že zanášení vzduchotechnických zařízení představuje reálný problém, který však zatím není systematicky řešen. To platí jak pro provoz, tak i pro návrh nových zařízení. V již provozovaných budovách se pro odstraňování nánosů používá proces čištění. Kapitola se zabývá především zanášením a čištěním

vzduchových kanálů, které lze čistit za pomoci technologií dostupných na trhu. Ty mohou být tradiční (suché, mokré čištění) či progresivní (čištění suchým ledem).

5.1 Zanášení ve vzduchovodech

Vzduch pohybující se ve větracích zařízeních obsahuje částice především tuhých látek (prach), které vstupují z venkovního prostředí nebo vznikají přímo v budově činností lidí či strojů. Zanášení představuje proces usazování nečistot obsažených v dopravovaném vzduchu na vnitřní pracovní plochu vzduchovodů. Tyto usazeniny prachu se nestávají pevnou součástí povrchu, avšak při běžném provozu zůstávají přichyceny na povrchu a ovlivňují proudění kanálem.

Zanášení se vyskytuje v mnoha procesních a energetických odvětvích, ve kterých působí převážně negativně (nesprávná funkce, trvanlivost zařízení). Setkáváme se s ním především při provozu výměníků tepla, v němž se vyskytují různé mechanismy zanášení (sedimentačních, korozní, biologické, chemické, krystalizační) [38]. Ve vzduchotechnické oblasti, při proudění vzduchu je nejčastějším mechanismem zanášení sedimentační.

Sedimentační zanášení:

Proudící vzduch obsahuje částice nečistot, které se usazují na pracovní vnitřní plochu vzduchovodů. Po přichycení prvních částic postupně vzniká vrstva nánosu, na které se usazují další vrstvy.

Velikost zanesení lze hodnotit na základě koncentrace usazených nečistot. Na koncentraci nečistot na vnitřním povrchu potrubí má vliv řada faktorů [39]. Mezi hlavní faktory patří:

- koncentrace částic ve vstupujícím vzduchu,
- doba provozu,
- délka vzduchovodu,
- materiál a výroba vzduchovodů.

Tab. 8 zobrazuje, jakým způsobem významné faktory ovlivňují koncentraci usazených nečistot (prach, mikroorganismy) uvnitř potrubí.

Faktor:	Vliv na koncentraci:	
	prachu	mikroorganismu
koncentrace částic a mikroorganismů ve vzduchu	↑	↑
třída filtru	↓	↓
provozní doba	↑	—
množství vody (relativní vlhkost, kondenzace) ve vzduchu	—	↑
rychlost vzduchu	—	↑
Legenda: ↑= zvýšení, ↓= snížení, — nevýznamné		

Tab. 8: Vliv významných faktorů na koncentraci usazených nečistot, upraveno dle [39]

Charakter zanášení ovlivňuje velikost a především hustota částic obsažených v proudícím vzduchu. Při vysoké koncentraci částic ve vzduchu lze předpokládat riziko častějšího

usazování, neboť do systému i přes použití filtrů vstupuje větší množství nečistot. Použitím účinnějších filtrů lze omezit vstup nečistot a zmírnit zanášení.

Tvorba nánosu je ovlivněna působením sil na částici. Jedná se především o gravitační, setrvačné a elektrostatické síly. Je tedy zřejmé, že zanášení bude vlivem gravitace intenzivnější v horizontálních úsecích potrubí, ve kterých probíhá usazování převážně na spodní straně potrubí. Ve vertikálně umístěných vzduchovodech se lze naopak setkat se souvislejší vrstvou znečištění po celém obvodu.

Velikost částic je určena především typem znečištění. V praxi se lze setkat s mnoha druhy částic, které lze rozdělit podle charakteru do následujících oblastí s typickými příklady (viz tab. 9).

Typ znečištění	Příklady
jemný lehký prach	bavlněná vlákna, dřevitá moučka, pyl, popel
suchý prach a prášek	jemný gumový prach, prach z bavlny, hoblovačky, kožené hobliny
běžný průmyslový prach	brusný prach, žulový prach, křemičitá moučka, vápencový prach, azbestový prach, keramický prach, cihelný prach
těžký prach	kovové třísky a piliny, olověný prach, železný prach
mastné nečistoty	oleje, maziva, emulze,
biologické	mikroorganismy, bakterie, viry, plísně, hmyz

Tab. 9: Rozdělení typických druhů nečistot, upraveno dle [40]

Tvar a provedení sítě vzduchovodů mohou přispívat ke zvýšenému zanášení. V okolí přechodových prvků a hran se mohou nečistoty koncentrovat a vytvářet lokální nánosy. Vzduchovod je v přímém kontaktu s nánosem a drsnost stěny tedy určuje, jak snadno se budou částice nečistot usazovat na povrchu. Při vyšších drsnostech je povrch náchylnější pro usazení nečistot. Pokud je povrch vzduchovodu zvrásněný, mohou být vrstvy znečištění velmi výrazné (viz obr. 24a).



Obr. 24: a) Znečištění ohebné hadice odvodního vzduchovodu [41]

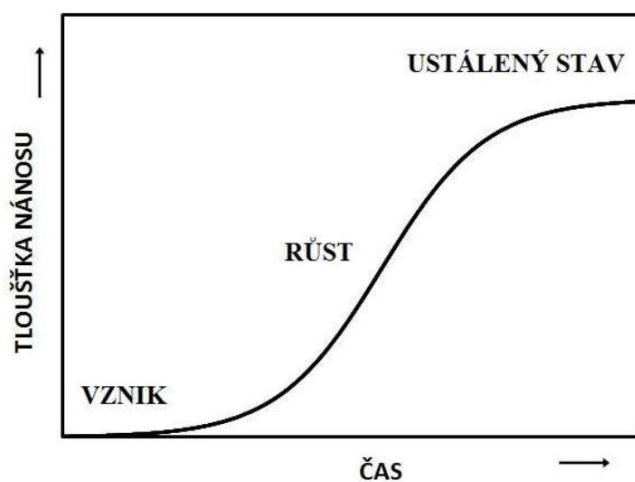
b) Znečištění hranatého přívodního potrubí

5.1.1 Stádia zanášení

Zanesení obecně představuje proces, který začíná na čistém, či již znečištěném povrchu a postupem času se vrstva nánosu zvětšuje (obr. 25). Proces zanášení lze rozdělit do několika stádií, které na sebe plynule navazují a dají se také shrnout do tří fází: vznik, růst a ustálený stav vrstvy nánosu [38]:

- transport hmoty,
- tvorba a růst nánosu,
- odstranění nebo zpomalení růstu nánosu.

Transport hmoty lze chápat jako vstup znečišťujících částic do vzduchotechnického systému.



Obr. 25: Základní fáze zanášení [38]

Nejčastějšími variantami je vstup již před montáží a během montáže potrubí do budovy, kdy jsou vzduchovody často nevhodně uskladněny [36], [39]. Nečistoty vnikají do systému také skrz netěsnosti a spoje vzduchovodů. Použití filtrů zamezuje přímému vstupu částic. V praxi se vyskytují však situace, kdy do potrubí vstupuje velmi znečištěný vzduch, který je filtrován až na konci odtahového potrubí (průmyslové odtahy svařoven nebo obráběcích stojů).

Počáteční fáze tvorby nánosu představuje ulpívání prvních částic na čistém, či již znečištěném povrchu a lze říct, že s rostoucí drsností plochy se zvyšuje rychlost zachycení prvních vrstvy nečistot. Zde je vhodné uvést, že především nově instalované vzduchovody jsou již z výroby znečištěny tenkým filmem maziva, který je lepkavý a velmi usnadňuje počáteční přilnutí znečišťujících částic [36].

Růstem nánosu se zmenšuje průřez potrubí a při konstantním průtoku se zvyšuje rychlost proudícího vzduchu. Vzniklá vrstva však představuje zásah do provozních podmínek a negativně ovlivňuje tlakovou ztrátu. Tlakové ztráty třením jsou úměrně druhé mocnině rychlosti (viz kap. 4.2.) Například pro kruhové potrubí znamená změna průměru obvodovým zanesením o 5 % zvýšení tlakové ztráty přibližně o 30 %.

V ojedinělých případech specifického znečištění (např. emulzní odpary) může dojít k výraznému zanesení (viz obr. 26), které může skončit ucpáním a nefunkčností vzduchotechnického zařízení.



Obr. 26: Zanešení odtahového potrubí obráběcích NC strojů [42]

5.2 Čištění vzduchovodů

Cílem čištění je odstranění vzniklého znečištění a uvedení zařízení do původní, či přijatelné úrovně čistoty. V posledních letech se zvýšilo povědomí o důležitosti čištění vzduchových kanálů. Byly vydány normy, které předepisují požadavky a postupy nezbytné pro hodnocení a udržování čistoty potrubních vzduchotechnických zařízení. K dispozici jsou směrnice mezinárodních asociací (NADCA [40], REHVA [43]), jež určují kritéria čistoty ventilačních zařízení a postupy pro vyhodnocování a čištění.

5.2.1 Kritéria čistoty

Kritéria čistoty jsou rozdílná pro nové instalované vzduchovody a již provozované systémy. Dle ČSN EN 15780 jsou definovány tři základní třídy čistoty, které mají rozdílnou přijatelnou úroveň čistoty. Úroveň čistoty je vyjádřena jako poměr hmotností prachu na ploše vzduchovodu. Limitní hodnoty pro prach akumulovaný v **nově instalovaných** vzduchovodech jsou zobrazeny v tab. 10. Zmíněná norma se však nevztahuje na vzduchotechnická zařízení pro průmyslové procesy.

Třída čistoty	Přijatelná úroveň usazeného prachu Přívodní, oběhový vzduchovod	Přijatelná úroveň usazeného prachu Odváděcí vzduchovod
A nízká	< 0,9 g/m ²	< 1,8 g/m ²
B střední	< 0,6 g/m ²	< 1,8 g/m ²
C vysoká	< 0,3 g/m ²	< 0,9 g/m ²

Tab. 10: Přijatelná úroveň čistoty v nově instalovaných vzduchovodech dle ČSN EN 15780

Úrovně čistoty pro **již provozované vzduchovody** se vztahují i na vnitřní prostor vzduchotechnické jednotky (viz tab. 11).

Třída čistoty	Přijatelná úroveň usazeného prachu Přívodní vzduchovody	Přijatelná úroveň usazeného prachu Vzduchovod oběhového vzduchu
A nízká	< 4,5 g/m ²	< 6,0 g/m ²
B střední	< 3,0 g/m ²	< 4,5 g/m ²
C vysoká	< 0,6 g/m ²	< 3,0 g/m ²

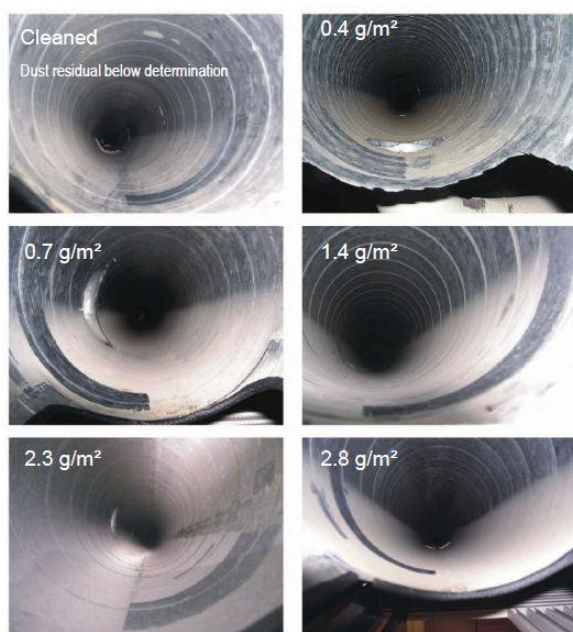
Tab. 11: Přijatelná úroveň čistoty v provozovaných vzduchovodech dle ČSN EN 15780

Třídy čistoty mají rozdílné požadované limitní hodnoty v závislosti na druhu objektu:

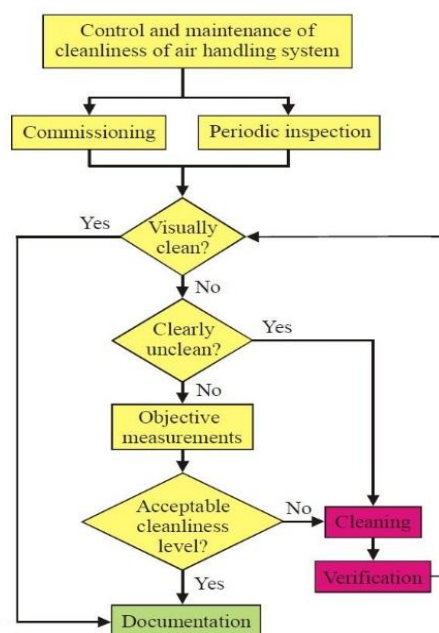
- **A nízká** – místnosti bez trvalé přítomnosti osob, např. sklady, technické místnosti
- **B střední** – kanceláře, hotely, restaurace, školy, divadla, obytné budovy, obchodní plochy, výstavní budovy, sportovní haly, obecné prostory v nemocnicích a obecné pracovní plochy v průmyslu
- **C vysoká** – laboratoře, ošetrovací prostory v nemocnicích, reprezentační kanceláře, VZT jednotky v hygienickém provedení

Posuzování čistoty se provádí na základě metod hodnocení usazování prachu. Nejjednodušší metody jsou založeny na vizuálním pozorování znečištěného povrchu a porovnání pomocí etalonové stupnice (viz obr. 27). Složitější metody jsou založeny na přímém odběru vzorku (odběr lepicí páskou, odběr na filtr, odsávací metoda) či na měření tloušťky usazenin (hřebenová metoda). Nejrozšířenější metodami jsou odběr vzorků na filtr, NADCA odsávací metoda a kartáčová metoda.

Vizuální posouzení čistoty je počáteční forma kontroly, podle níž se rozhoduje, zda bude použita účinnější měřicí metoda. Ke splnění požadované třídy čistoty by měly výsledky posouzení čistoty vykazovat nižší hodnoty než limitní hodnoty v tabulkách výše. Dílčí kroky ověřování čistoty jsou názorně zobrazeny na obr. 28.



Obr. 27: Referenční stupnice zanešení vzduchovodů (39)



Obr. 28: Algoritmus ověřování čistoty (39)

5.3 Metody čištění

V praxi se lze setkat s mnoha metodami čištění vzduchotechnických zařízení. Základní rozdělení těchto metod je:

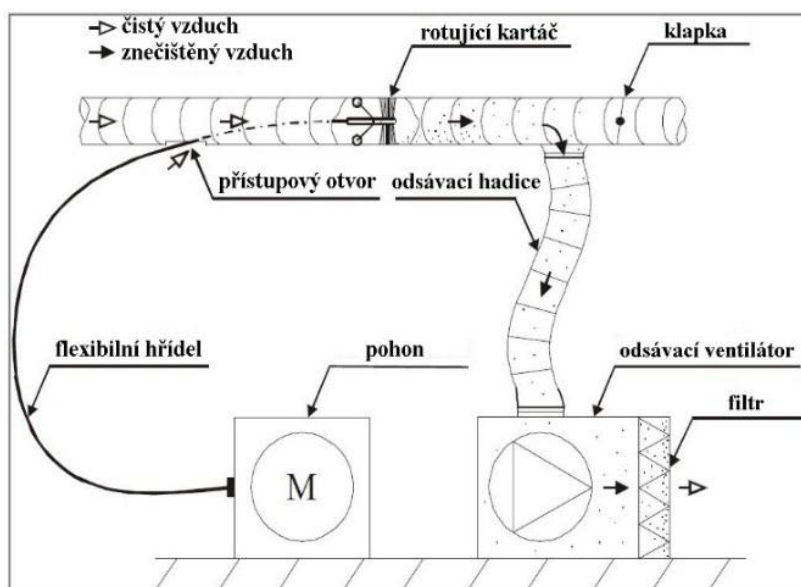
- suché čištění a
- mokrý čištění.

Mezi suché čištění patří např. čištění stlačeným vzduchem, mechanické kartáčování, ruční vysávání a tryskání suchým ledem. Mokrý metody čištění představují např. parní tryskání, chemické sprejování. Ve všech používaných metodách je prach po odstranění z povrchu transportován mimo zařízení nejčastěji výkonným odtahem vzduchu a shromažďován ve filtračním zařízení (filtr, odlučovač, cyklon). Proces čištění je náročná práce vyžadující obsluhu zkušených pracovníků. Pro lepší přístup do často rozsáhlé sítě vzduchovodů jsou používáni čisticí roboti, kteří jsou vybaveni vlastním pohonem a často i kamerou pro sledování čisticího procesu [37].

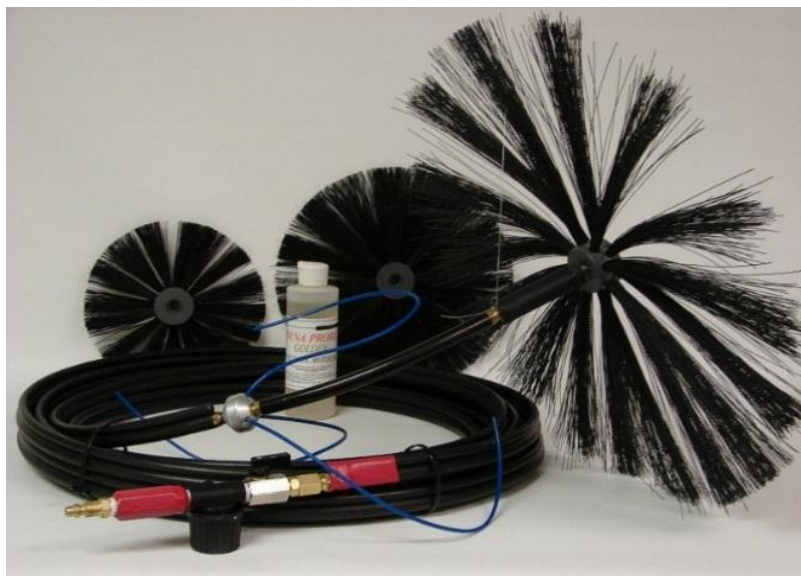
5.3.1 Mechanické kartáčování

Použití rotačních kartáčů (viz obr. 30) pohaných elektrickým či pneumatickým motorem umožňuje přímý kontakt nečistoty s čisticím elementem a díky abrazivnímu účinku kartáče dochází k odstranění nečistot. Průměr rotačního kartáče (100 – 1000mm) umožňuje čištění malých i větších průřezů kruhového i obdélníkového tvaru. Štětiny kartáče jsou vyráběny z materiálů různých tvrdostí. Změna frekvence otáčení a rychlosti posunu s eventuálním použitím chemických prostředků dovoluje zvýšit účinnost čištění.

Kartáč je při čištění zaveden do vzduchovodu a pohaněn flexibilní hřídelí, což umožňuje čištění delších úseků bez nutnosti nových přístupových otvorů. Plynulý posun kartáče může být zajištěn vedením pomocí stabilizačních koleček. Podtlak vyvolaný ventilátorem odsává znečištěný vzduch skrz odsávací hadici do filtru, ve kterém je shromažďován a následně likvidován. Schéma čištění je zobrazeno na obr. 29.



Obr. 29: Schéma mechanického kartáčování s odsávacím ventilátorem, upraveno dle [36]



Obr. 30: Rotační kartáče pro čištění potrubí [44]

5.3.2 Tryskání suchým ledem

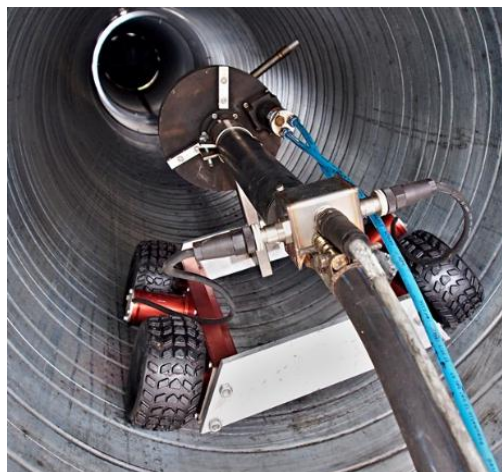
Tryskání pevných částic oxidu uhličitého (viz obr. 31), jež jsou urychlovány stlačeným vzduchem, představuje relativně novou metodu čištění vzduchovodů vhodnou i pro náročné čištění v průmyslu (lokální odtahy). Při dopadu částice CO_2 sublimují a mnohonásobně zvětšují svůj objem (500krát), což ve spojení s energií stlačeného vzduchu pomáhá odstraňovat nečistoty. Teplota suchého ledu při vstupu do tryskacího zařízení dosahuje $-79\text{ }^\circ\text{C}$, díky čemuž se čištěná plocha podchlazuje a například mastné nečistoty křehnou a lépe se odstraňují. Rychlost částic závisí na tlaku kompresoru, který vyrábí stlačený vzduch (v praxi obvykle 5,5 baru) a provedení trysky urychlující směs vzduchu a suchého ledu [45].

Pro čištění touto technologií lze použít robota speciální konstrukce (viz obr. 32), jenž umožňuje plynulý pojezd. Tryska upevněná v přední části se otáčí, tak aby byl čištěn celý obvod potrubí. Stejně jako u rotačního kartáčování jsou nečistoty po odstranění odtahovány a shromažďovány mimo potrubí.

Výhody této metody jsou dány vlastnostmi suchého ledu (teplota, netoxičita, rychlost sublimace, nízká tvrdost). V současnosti působí na trhu pouze několik málo firem, které tuto relativně novou technologii používají i pro čištění vzduchovodů.



Obr. 31: Pelety suchého ledu [46]



Obr. 32: Čistící robot se zařízením na tryskání suchého ledu [45]

5.3.3 Čištění vodní parou

Díky vysoké teplotě přehřáté páry (150°C) je tato metoda vhodná pro čištění a desinfekci potrubí, která jsou znečištěna mastnotou (kuchyně, restaurace) a pro desinfekci hygienických provozů (laboratoře, nemocnice). Jedná se o mokrou metodu čištění, při které vzniká sekundární odpad ve formě znečištěné vody. Účinnost čištění lze zvýšit použitím chemických prostředků. Nevýhodou tohoto způsobu čištění je zvýšené riziko koroze.

5.3.4 Čištění chemické

Použití chemických prostředků je vhodné pro odstranění mastnoty v kuchyňských provozech či v odtazích digestoří. Chemikálie jsou účinné i pro desinfekci v čistých provozech a spolehlivě ničí biologické znečištění (bakterie, plísně, biofilmy). Nanášení chemických prostředků se děje za pomoci rozstřikovačů, díky kterým se účinná látka dostane i do těžko přístupných míst. Chemické čištění se také uplatňuje při čištění tepelných výměníků v klimatizačních jednotkách, ve kterých se vyskytují formy jiného znečištění (krystalizační, korozní).

5.3.5 Čištění stlačeným vzduchem

Princip čištění spočívá v odstranění nečistot stlačeným vzduchem, který je přiveden hadicí do vzduchovodu. Zvýšení účinku čištění lze docílit pomocí mechanického sklepávání nečistot. Metoda je vhodná pro lehce odstranitelné nánosy nečistot, především v úzkých špatně dostupných místech.

5.4 Opatření proti zanášení

Existuje množství opatření, která lze provádět pro omezení zanášení potrubí. Již ve stádiu návrhu a výroby potrubí lze volbou materiálu a vhodnou výrobní technologií omezit budoucí problémy. Cílem by mělo být použití vhodné řezné metody, při níž se neznečišťuje potrubí kovovými hoblinami a mazacími oleji [36].

Další problematickou fází je montáž potrubí a uvedení do provozu. Při nesprávném skladování je veliké riziko znečištění potrubí již na stavbě a počáteční kontaminace VZT systému.

V již provozovaných zařízeních je nutné dbát na pravidelnou údržbu a inspekci potrubí se zaměřením na čistotu vnitřního povrchu. Znečištění se netýká pouze potrubí, ale může se vyskytnout v jakékoliv části VZT systému a poté se dále rozšiřovat. Kontrola by se tedy měla zaměřit na všechna zařízení. Doporučené intervaly inspekce čistoty dle účelu budovy jsou uvedeny v tab. 12.

Účel budovy	jednotka VZT	přívodní potrubí	cirkulační potrubí
obytné	1 rok	2 roky	2 roky
obchodní	1 rok	1 rok	1 rok
průmyslové	1 rok	1 rok	1 rok
zdravotní	1 rok	1 rok	1 rok

Tab. 12: Doporučené intervaly inspekce čistoty VZT potrubí [40]

Souhrn některých opatření pro udržení čistoty vzduchovodů a celého VZT systému uvádí literatura [39]:

Opatření během návrhu:

- použití materiálu, který nevyžaduje mazání během výrobního procesu,
- použití materiálu, který sám nevytváří znečištění,
- vnitřní povrch potrubí by měl být hladký,
- omezení ostrých hran, přechodových kusů, samořezných šroubů ve stěnách potrubí,
- uzavření koncových částí potrubí při převozu a skladování před montáží, ponechání v originálních baleních do samotné instalace,
- kontrola všech částí před prvním uvedením do provozu, případné čištění před spuštěním,
- instalace filtračního zařízení, které čistí vzduch před vstupem do potrubí,
- instalace servisních otvorů pro inspekci a čištění.

Opatření během provozu:

- pravidelná kontrola a případné čištění vhodnou metodou během provozu,
- kontrola filtračního zařízení a servisních otvorů.

6 HODNOCENÍ Vlivu ZNEČIŠTĚNÍ

Při provozu vzduchotechnických zařízení, ve kterých je riziko zanášení, je důležité posoudit možné dopady znečištění. Jednou z důležitých oblastí je ekonomický dopad na provozní náklady spojené s dopravou vzduchu a údržbou VZT systému. Nános nečistot v potrubí zvyšuje tlakovou ztrátu, která při požadovaném konstantním průtoku musí být vykompenzována zvýšeným výkonem ventilátoru. Při hodnocení vlivu znečištění se lze zaměřit i na další oblasti jako hygienická a požární bezpečnost, které jsou však z hlediska možných energetických úspor nevýznamná.

Pro vyhodnocení vlivu znečištění na provoz vzduchotechnického zařízení lze použít některou z následujících metod:

- výpočet,
- experimentální měření (ideálně před a po vyčištění).

Cílem obou těchto metod je vyhodnotit tlakovou ztrátu vzniklou znečištěním. Následně je možné promítnout tuto ztrátu do provozních podmínek ventilátoru a vyhodnotit vliv na energetickou spotřebu ventilátoru. Porovnání provozních nákladů ventilátoru pro čisté či znečištěné potrubí pak představuje ekonomické zhodnocení dopadu znečištění.

6.1 Výpočtový nástroj

Pro vyhodnocení vlivu znečištění potrubních tras na provozní podmínky ventilátoru byl v roce 2014 na Ústavu procesního a ekologického inženýrství (ÚPEI) Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně vyvinut výpočtový nástroj. Tento nástroj byl vytvořen v pracovním prostředí Microsoft Excel a umožňuje přehledné ovládání a vkládání vstupních hodnot. V rámci diplomové práce byla vytvořena uživatelská příručka, ve které je nástroj detailně představen (viz příloha I).

Nástroj umožňuje po zadání následujících charakteristických vstupních hodnot:

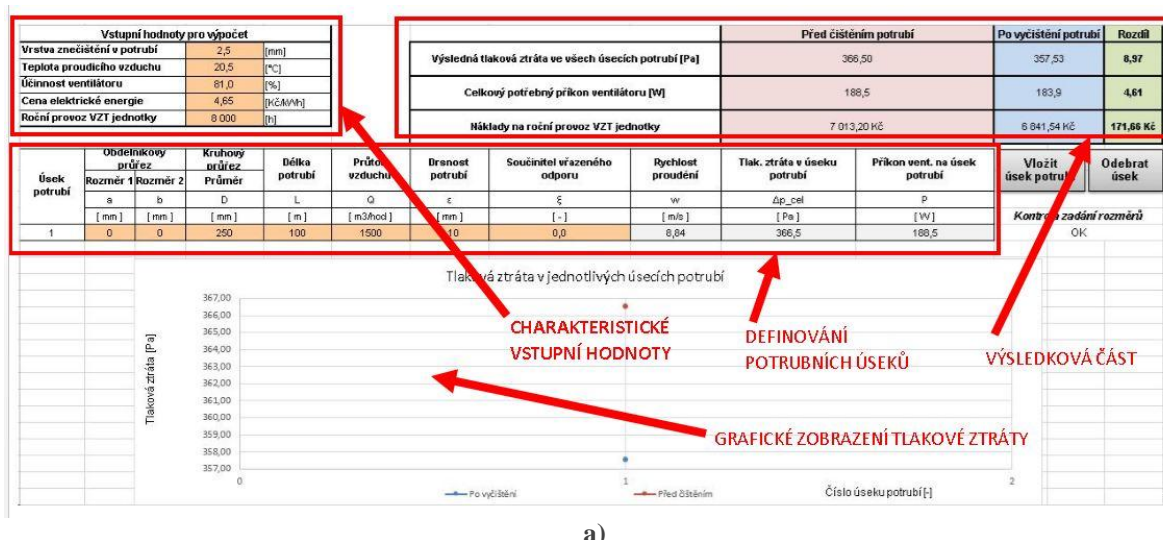
- vrstva znečištění v potrubí,
- teplota proudícího média,
- účinnost ventilátoru,
- cena elektrické energie,
- roční pracovní fond

a vstupních hodnot definujících potrubní úseky:

- rozměr potrubí (průřez, délka),
- objemový průtok vzduchu,
- drsnost potrubí,
- součinitelé vřazených místních ztrát

vypočítat výslednou tlakovou ztrátu, potřebný příkon ventilátoru pro dopravu vzduchu a ekonomické náklady na roční provoz, a to pro provoz ventilátoru ve znečištěném nebo čistém potrubí.

Pracovní prostředí výpočtového nástroje je rozděleno do několika logických bloků, které jsou zobrazeny na obr. 33.



a)

PŘED VYČIŠTĚNÍM

Plocha potrubí s nánosem	Obvod průřezného průřezu	Ekvivalentní průměr	Reynoldsovo číslo	Součinitel tření	Tlakové ztráty třením v potrubí	Tlakové ztráty místními odpory
$A_{potr,n}$	U	D_e	Re	λ	Δp_{fj}	Δp_{ξ}
[m ²]	[m]	[m]	[-]	[-]	[Pa]	[Pa]
0,0471	0,770	0,245	143 540	0,0191	366,50	0,00

Rychlost v (m/s)

	Rychlost v (m/s)			
	Hlavní větrve		Vedlejší větrve	
	doporučená	maximální	doporučená	maximální
větrání a nízkotlaká klimatizace	3,5 - 5	6	3	5
obytné budovy	5 - 7	8	3 - 4,5	6,5
veřejné budovy	6 - 9	11	4 - 5	9
průmyslové budovy	8 - 12	15 - 20	8 - 10	18

WÝPOČTOVÁ ČÁST ÚSEKU PŘED ČIŠTĚNÍM

WÝPOČTOVÁ ČÁST ÚSEKU PO ČIŠTĚNÍ

PO VYČIŠTĚNÍ

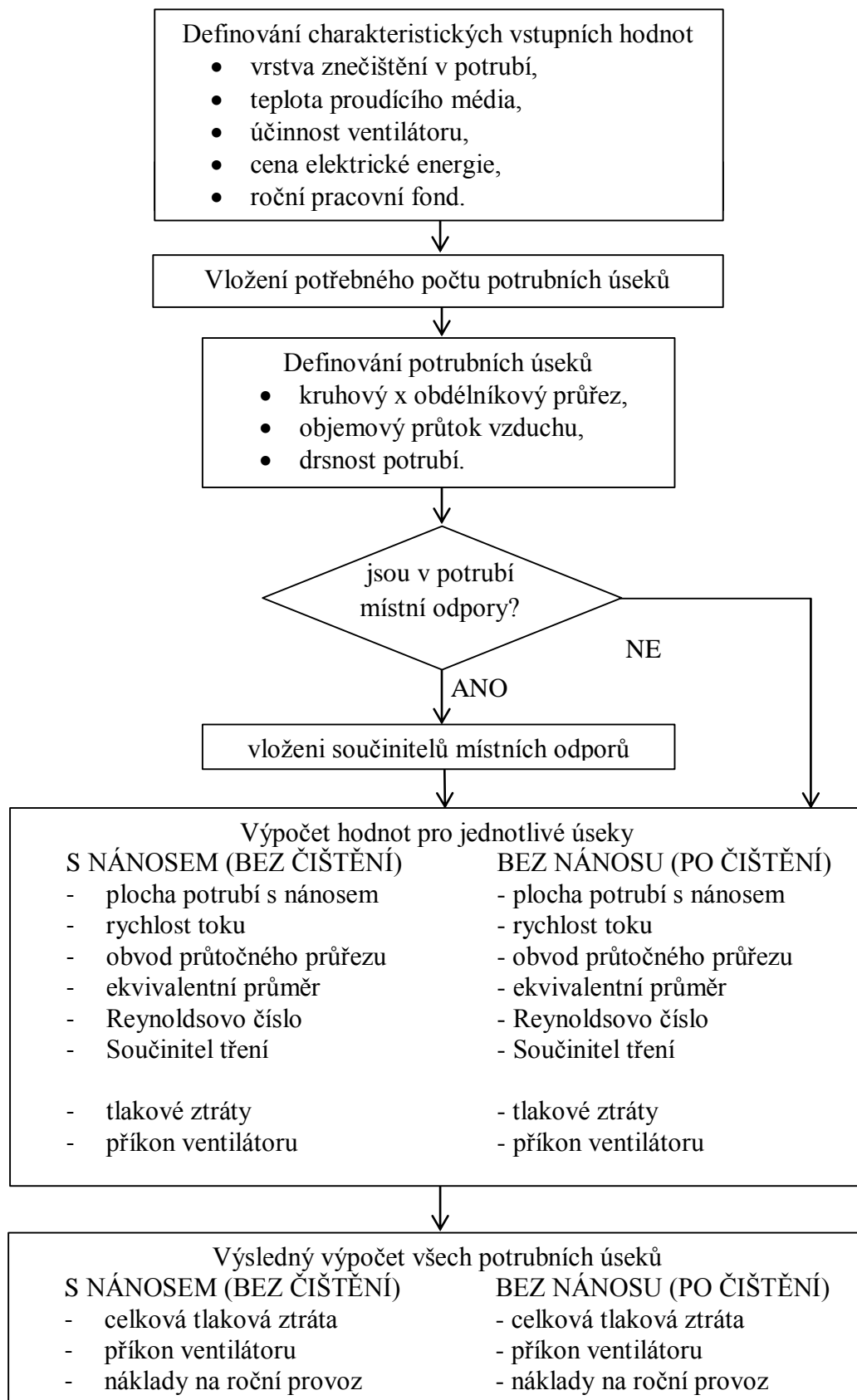
Plocha potrubí bez nánoasu	Obvod průřezného průřezu	Ekvivalentní průměr	Reynoldsovo číslo	Součinitel tření	Tlakové ztráty třením v potrubí	Tlakové ztráty místními odpory	Rychlost proudění	Tlak. ztráta v úseku potrubí	Příkon ventilátoru na úsek potrubí
A_{potr}	U	D_e	Re	λ	Δp_{fj}	Δp_{ξ}	w	Δp_{cel}	P
[m ²]	[m]	[m]	[-]	[-]	[Pa]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[W]
0,0491	0,765	0,250	145 470	0,0190	357,53	0,00	8,49	357,53	183,9

b)

Obr. 33: Pracovní prostředí výpočtového nástroje pro hodnocení vlivu znečištění VZT potrubí

6.1.1 Princip výpočtu

Postup a jednotlivé kroky výpočtu jsou názorně uvedeny v následujícím vývojovém diagramu.



6.3 Experimentální hodnocení vlivu zanešení

Cílem experimentálního měření je ověření dopadu zanesení vzduchotechnického potrubí na energetickou náročnost provozu VZT systému. Při experimentálním měření lze hodnotit tlakovou ztrátu vzniklou díky zúžení průtočného průřezu či ovlivnění rychlostního profilu proudu. Tato ztráta se projeví ve změně tlakové charakteristiky potrubní sítě a pro zajištění stejného průtoku i v charakteristice ventilátoru, čímž se mění pracovní bod ventilátoru. Změna pracovního bodu ventilátoru má přímý vliv na příkon ventilátoru. Z tohoto důvodu je další vhodnou variantou vyhodnocení změny tlakových poměrů měření příkonu ventilátoru vhanějícího vzduch do vzduchovodu. Následně lze provést odhad nákladů na provoz ventilátoru pro časově omezený úsek (např. roční).

Měření v provozu

Měření lze provést na úseku potrubí již fungujícího vzduchotechnického systému a vyhodnotit tak konkrétní vliv znečištění v daném případě. Měření je vhodné provádět v sérii dvou měření:

- a) ve znečištěném stavu,
- b) v čistém stavu (ihned po čištění).

V obou případech je nutné, aby byly podmínky měření shodné. Mezi nejdůležitější podmínky patří především: konstantní průtok vzduchu, vlhkost a teplota proudícího vzduchu. Nedodržením těchto podmínek může vést ke zkreslení naměřených hodnot a špatné interpretaci vlivu zanešení.

Před zahájením měření musí být stanovena místa měření (vhodný úsek potrubí), postupy měření a měřicí přístroje. Jelikož se jedná o zásah do provozovaného zařízení, existují určitá rizika, na která je nutné brát ohled. Pokud je měření prováděno za provozu nesmí být negativně ovlivněno pracovní prostředí či výroba. Vstup do vzduchotechniky je možný revizními otvory, které musí být následně řádně uzavřeny.

V rámci diplomové práce bylo provedeno měření ve vzduchotechnickém systému masokombinátu a následným vyhodnocením dopadů vyčištění na provoz ventilátoru (viz kap. 8)

Laboratorní měření na zkušebním potrubí

Vliv zanášení je možné zkoumat na úseku měřicí tratě, který je zhotoven k tomuto účelu. Analýzy je vhodné provádět ve vhodných, nejlépe laboratorních podmínkách. Navrhnutá trať se musí skládat z referenčního potrubí, na kterém lze simulovat zanesení formou zúžení průřezu. Místní zúžení průřezu lze provést použitím vzduchové regulační clony, zúžení po celé délce potrubí naopak vložení vhodné vrstvy napodobující zanešení (např. molitanové pásy). Součástí potrubí je přívodní nebo odtahový ventilátor s regulací otáček.

Výhody měření jsou v možnosti uzpůsobit si měřicí trať podle předem připravených požadavků. Změnou velikosti zanešení a provozních podmínek ventilátoru lze vytvořit velké množství měřících variant a efektivně studovat dopady znečištění.

V rámci diplomové práce navržena a zkonstruována konkrétní měřicí trať se jmenovitým průměrem potrubí DN 200. Byl vytvořen plán měření, dle kterého je vhodné provádět testování na této měřicí trati (viz kap. 7).

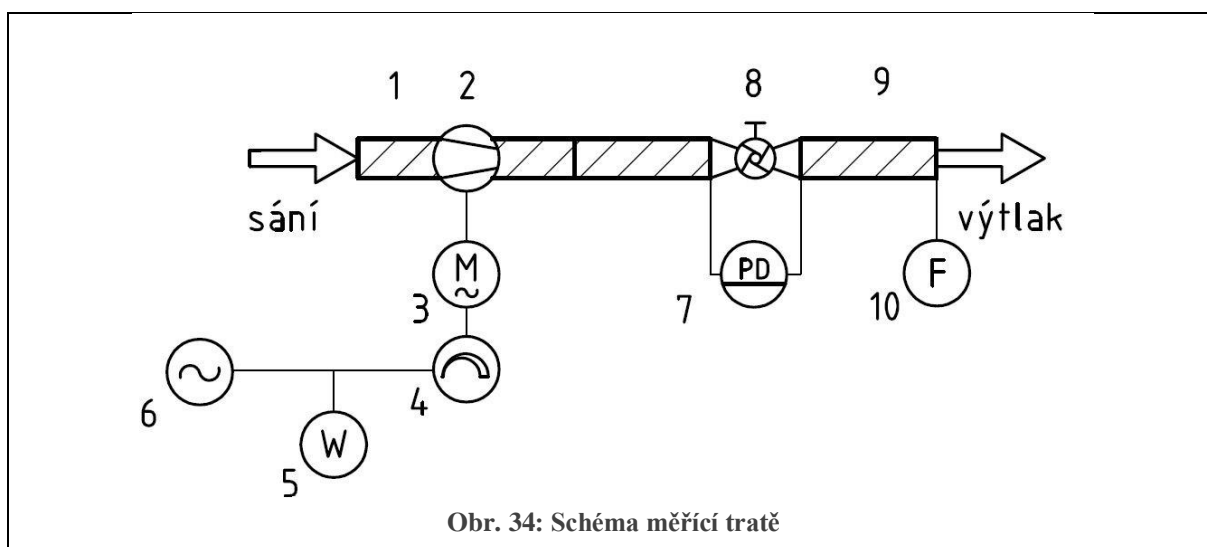
7 NÁVRH MĚŘICÍ TRATĚ

Pro zkoumání vlivu zanášení na tlakové ztráty a příkon přívodního vzduchového ventilátoru byla navržena a zkonstruována měřicí laboratorní trať, která je nyní součástí Laboratoře energeticky náročných procesů NETME Centre a bude v budoucnu využita pro účely výuky studentů magisterského studia.

Měřicí trať umožňuje pro zvolený průtok vzduchu, který je vháněn axiálním ventilátorem do kruhového potrubí, měnit tlakovou charakteristiku potrubí. Součástí potrubí je regulační clona, která slouží jako škrťací element a vyvolává v potrubí místní tlakovou ztrátu napodobující lokální zanešení. Souvislé zúžení potrubí po délce je realizováno vkládáním molitanových desek po obvodu vnitřního potrubí. To má napodobit situaci souvislého zanesení. Kombinací obou variant se mění tlaková charakteristika potrubí a díky posunu pracovního bodu ventilátoru i příkon samotného ventilátoru, který bude měřen a zaznamenán analyzátelem výkonu.

7.1 Schéma měřicí tratě

Trať se skládá z potrubního ventilátoru, jenž je vřazen do kruhového potrubí o nominální světlosti DN 200. Na potrubí dále navazuje regulační clona, skrze kterou proudí vzduch do konečného úseku potrubí, jehož vnitřní průměr se modifikuje vkládáním molitanových desek. Díky poloze ventilátoru je potrubní úsek s clonou přetlakový a vzduch je do něj vháněn. Změna otáček střídavého motoru probíhá pomocí regulátoru otáček. Příkon ventilátoru snímá připojený analyzátor výkonu. Pro zaznamenání tlakového rozdílu je v trati umístěn snímač diferenčního tlaku. Schéma trati je zobrazeno na obr. 34.

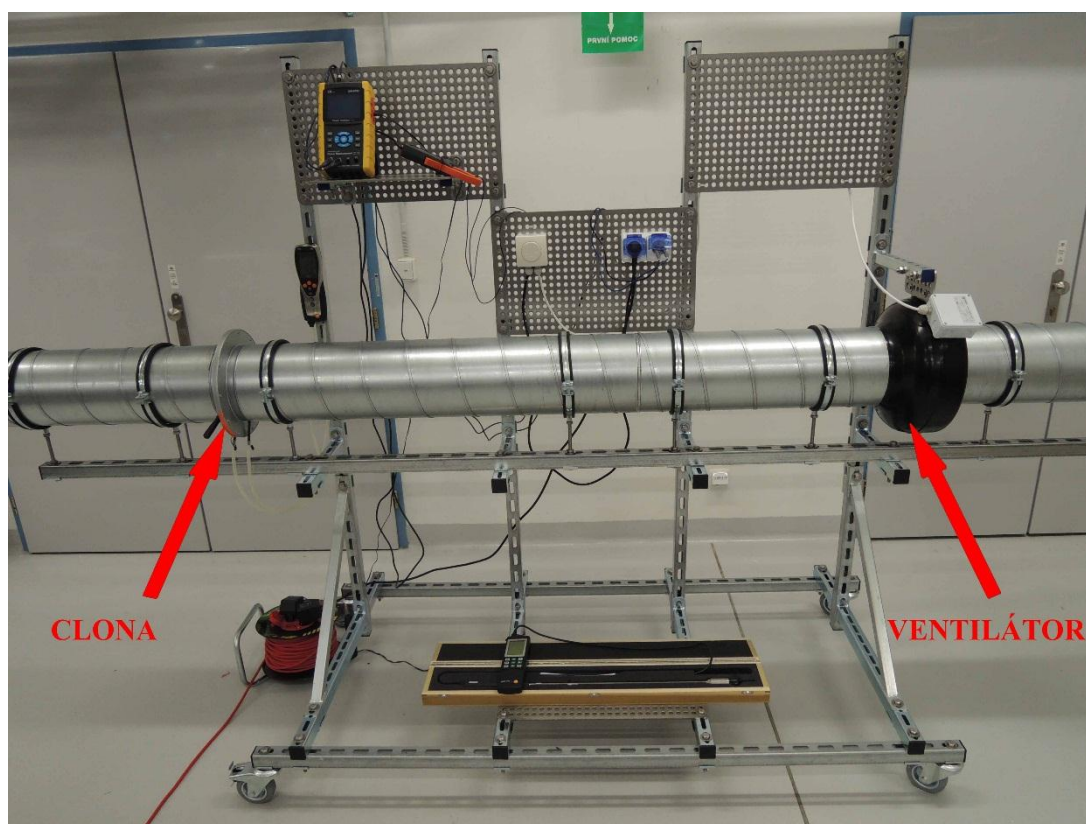


- 1 Vzduchotechnické potrubí Spiro DN 200
- 2 Axiální potrubní ventilátor
- 3 Střídavý motor ventilátoru

- 4 Regulátor otáček
- 5 Analyzátor výkonu
- 6 Elektrický zdroj
- 7 Snímač diferenčního tlaku
- 8 Regulační a měřicí clona Iris 200
- 9 Úsek potrubí pro vložení molitanových desek
- 10 Vrtulková ruční sonda

7.2 Popis měřicí tratě

Na obr. 35 je zobrazena měřicí trať, která byla zkonstruována v Laboratoři energeticky náročných procesů NETME Centra. Trať je umístěna na pojezdové základně a lze ji libovolně přemisťovat. Na nosné konstrukci jsou umístěny všechny potřebné měřicí přístroje.



Obr. 35: Měřicí vzduchotechnická trať

Potrubí je složeno ze čtyř úseků v délkách 600 mm a 1000 mm. Kratší úseky jsou připojeny z obou stran k ventilátoru, zatímco delší úseky navazují na clonu. Spojení úseků uprostřed trati je realizováno potrubní spojkou. Kruhové potrubí je upevněno osmi svisle umístěnými objímkami. Axiální ventilátor je ukotven šrouby na nosník, což zajišťuje potřebnou stabilitu potrubí. Regulátor otáček ventilátoru i zásuvka pro měření příkonu se nacházejí nad potrubím na nosné konstrukci.

7.3 Metoda měření

Zkonstruovaná vzduchová trať umožňuje přímo měřit následující veličiny:

- příkon axiálního ventilátoru [W],
- tlakový rozdíl před a za clonou [Pa],
- rychlost proudícího vzduchu [m/s]

a výpočtem pomocí tlakové diference na regulační cloně určit:

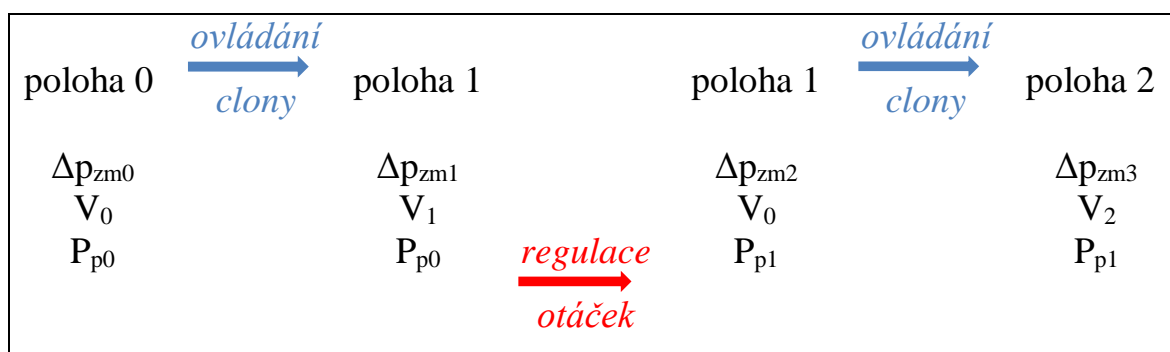
- průtok proudícího vzduchu [m³/s].

Příkon ventilátoru je možné plynule měnit regulátorem otáček do maximální hodnoty 170 W. Regulační clonu lze z krajní polohy, při které je plně otevřená (Ø 199 mm), uzavřít do průřezu o průměru Ø 99 mm, přičemž je vhodné při instalaci v potrubí využít již označené polohy očíslované od 0 až po 8.

Rychlost proudícího vzduchu lze měřit vrtulkovou ruční sondou v jednotlivých místech průřezu na konci potrubí. Tlakový rozdíl regulační clony měřený diferenčním snímačem tlaku umožňuje dopočítat průtok proudícího vzduchu uvnitř potrubí a na jeho základě regulovat ventilátor na konstantní průtok vzduchu.

7.3.1 Změna průřezu regulační clonou

Pro počáteční zvolený průtok vzduchu v rozmezí 40 – 50 % maximálního výkonu ventilátoru bude postupným zavíráním regulační clony zvyšována místní tlaková ztráta. Maximální průměr clony 199 mm bude v předdefinovaných krocích (poloha 1, 2, až 8) postupně snižován. Tato změna průřezu povede ke snížení průtoku vzduchu, který bude kompenzován zvýšením příkonu pomocí regulátoru otáček ventilátoru tak, aby byl dosažen počáteční zvolený průtok. Při každém zúžení průměru budou zaznamenány níže uvedené měřené veličiny. Na obr. 36 jsou zobrazeny dílčí kroky prováděné při měření a jejich dopad na měřené veličiny.



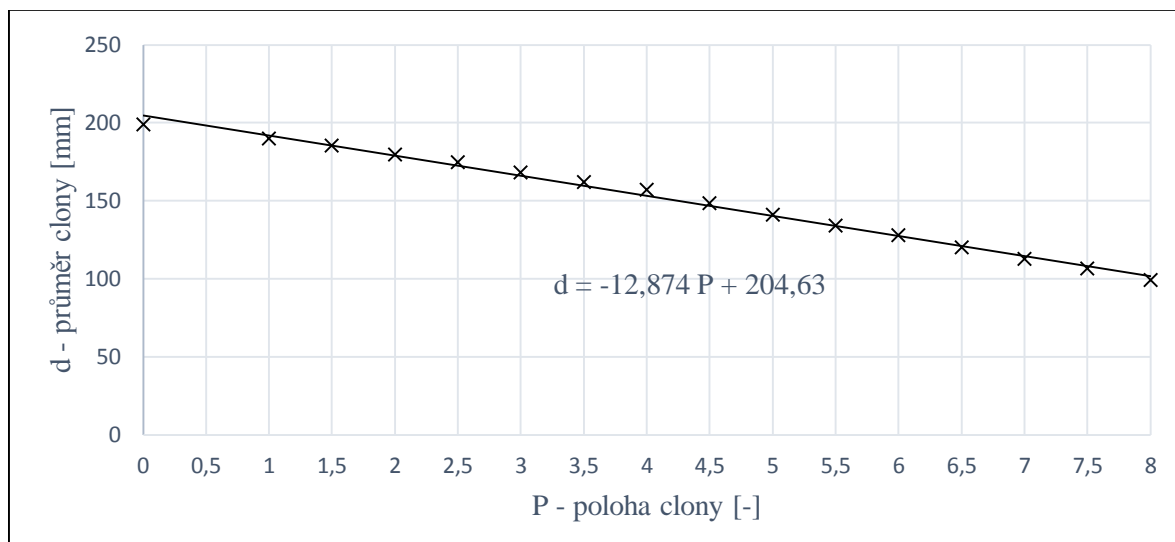
Vysvětlivky: Δp_{zm} - tlaková ztráta regulační clony, V - objemový průtok, P_p - příkon ventilátoru

Obr. 36: Krokové schéma měření

7.3.2 Změna průřezu nastavením clony a vkládáním molitanových desek

Při této variantě bude tlaková ztráta v potrubí zvyšována nejen regulační clonou, ale také vkládáním molitanové desky na vnitřní povrch potrubí. Desky ve variantách rozměrů 800 x 628 x 10mm, 800 x 628 x 20mm a 800 x 628 x 30mm budou vkládány do úseku potrubí za regulační

clonou, přičemž jejich upevnění na vnitřní povrch potrubí bude provedeno pomocí oboustranné lepicí pásky. Regulační clona bude nastavena v pozici, ve které profil průřezu v místě clony bude shodný s profilem průřezu v místě vložené desky (odpovídá průměru clony 179 mm, 159mm, 139mm). Přesná poloha clony bude nastavena pomocí cejchovní křivky clony zobrazené na obr 37. Průtok vzduchu bude při změně průřezu (vložení desky, přivření clony) opět regulován na konstantní hodnotu pomocí regulátoru otáček a změřený příkon ventilátoru s ostatními veličinami bude zaznamenán. Postup je shodný s měřením s regulační clonou.



Obr. 37: Cejchovní křivka regulační clony

7.3.3 Modifikace trati

Při návrhu trati bylo zamýšleno provádět úpravy potrubní části a měnit tak podmínky měření. Na zkonstruované trati lze provést následující modifikace, které ovlivňují charakteristiku potrubí nebo směr proudění vzduchu.

- Změna umístění molitanové desky před clonu** – umístěním desky před clonu se přesune zúžení potrubí blíže k ventilátoru, čímž pravděpodobně vzniknou další tlakové ztráty při výstupu vzduchu z ventilátoru. Tato modifikace umožní sledovat vliv nesprávného umístění tvarovek v blízkosti ventilátoru. Pro vložení desky před clonu je nutné demontovat části potrubí mezi ventilátorem a clonou.
- Odtahový směr proudění otočením ventilátoru** – tímto se měřený úsek trati stane podtlakovým, což je typické pro odtahové systémy. Lze předpokládat podobný průběh příkonové charakteristiky ventilátoru.

7.4 Postup experimentu

Postup experimentu obnáší sled činností, které jsou prováděny před samotným měřením.

1. Vizuální kontrola úplnosti měřicí tratě, upevnění jednotlivých částí, kontrola funkčnosti regulační clony.
2. Zkouška ventilátoru a jeho regulace.
 - vizuální kontrola ventilátoru,
 - připojení ventilátoru k elektrické síti,
 - spuštění ventilátoru pomocí regulátoru s vypínačem,
 - změna otáček ventilátoru vícepolohovým regulátorem, ověření funkčnosti regulátoru,
 - zastavení ventilátoru a odpojení od sítě.
3. Umístění a připojení analyzátoru výkonu na označené přívodní kabely motoru ventilátoru, připojení hadiček snímače diferenčního tlaku na regulační cloně, umístění vrtulkového anemometru (dle dostupných manuálů).
4. Kontrola funkčnosti a nastavení měřících zařízení
5. **Provedení měření a zaznamenání naměřených veličin**
6. Vypnutí ventilátoru a odpojení měřících přístrojů

7.5 Hlavní části měřicí tratě



Obr. 38: Regulační clona Iris 200

IRIS 200 Regulační a měřicí clona

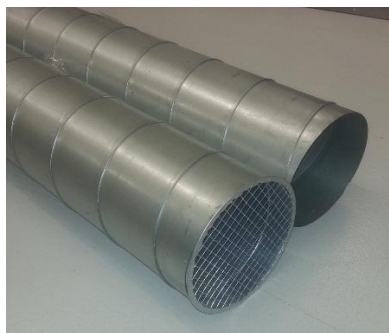
Maximální vnitřní průměr [mm]: 199
Minimální vnitřní průměr [mm]: 99
Hmotnost: [kg] 1,6
Rozsah použití [m³/h]: 180 – 1200
Dva hadicové vstupy pro měření tlaku



Obr. 39: Ventilátor Dalap Turbine

Ventilátor Dalap Turbine Ø 200 mm

Průtok vzduchu [m³/h]: 1200
Statický tlak [Pa]: 465
Otáčky motoru [ot/min]: 2430
Napájení [V/Hz]: 230/50
Výkon [W]: 170



Obr. 40: Spiro potrubí 200

SPIRO pozinkované potrubí Ø 200 mm

Vnitřní průměr [mm]: 200
Tloušťka plechu [mm]: 0,5
Vnitřní obvod [m]: 0,628
Maximální přetlak [Pa]: 6300
Maximální podtlak [Pa]: 2500

7.6 Měřicí přístroje



Obr. 41: Měřicí přístroj TESTO

Multifunkční měřicí přístroj TESTO 435

Interní snímač diferenčního tlaku

Měřicí rozsah: 0...+2500 Pa
Přesnost: ± 2 Pa
Rozlišení: 1 Pa

Teleskopická vrtulková sonda 16 mm

Měřicí rozsah: 0,6...20 m/s
Přesnost: $\pm (0,2 \text{ m/s} \pm 1\%)$
Rozlišení: 0,1 m/s



Obr. 42: Analyzátor výkonu
LUTRON [47]

Třífázový analyzátor výkonu LUTRON DW-6092

Měřicí rozsah: 0...9,999 kW
Přesnost: $\pm (1\% + 8 \text{ W})$
Rozlišení: 1 W

8 MĚŘENÍ V PROVOZU

Tato kapitola představuje zkrácenou verzi měření, jejíž kompletní verzi lze najít v příloze II.

Experimentální měření ve firmě Masokombinát Polička a.s. proběhlo v březnu roku 2015. V lednu byla provedena první prohlídka areálu firmy se zaměřením na chladicí a vzduchotechnický systém. Po konzultaci s technikem bylo navrženo měření příkonu ventilátoru, který zabezpečuje větrání v jedné z chladíren sloužící k expedici masa. Cílem měření bylo zjistit, jaký vliv představuje znečištění vzduchotechnického potrubí (textilní vyústky) na příkon ventilátoru zajišťující cirkulaci vzduchu. Nutností bylo rozdělit experimentální měření do dvou dní, přičemž v mezidobí proběhlo v masokombinátu čištění vyústek.

8.1 Místo měření

Pro měření byla vybrána chladárna expedovaného masa 103 o rozměrech 25 x 26,9 m. Chlazení a cirkulace vzduchu v chladárně je zajištěna přístěnnými deskovými výparníky AGHN 071.2E/110-AND/30P.E firmy Guntner AG & Co. KG. Pro rovnoměrnou distribuci vzduchu a zaručení stálých teplot jsou na výparníky napojeny textilní vyústky firmy Příhoda s.r.o. Tyto vyústky rozptylují vzduch bez vzniku průvanů (obr. 43).

Výparník AGHN071	nominální výkon	23 kW
	rozměry	2100 x 900 x 955 mm
Ventilátor VT01243	průměr	710 mm
	otáčky	900 min ⁻¹
	napájení	400 V/50 Hz
	elektrický příkon	0,88 kW
	objemový průtok vzduchu	12550 m ³ /h
Textilní vyústka	délka	6 m
	materiál	prodyšný polyester PMS
	gramáž	180 – 350 g/m ²

Tab. 13: Technické data měřených objektů



Obr. 43: Přístěnný výparník s axiálním ventilátorem, který je napojen na textilní vyústku

8.2 Plán měření

1. prohlídka závodu Masokombinát Polička a seznámení se se systémy vzduchotechniky a chlazení
2. vybrání chladírny a vhodného ventilátoru k měření
3. určení způsobu měření, vypůjčení měřicího přístroje na FSI VUT, stanovení počtu a délky měření
4. určit dny měření s ohledem na čištění vyústek
5. uskutečnit měření č. 1
 - a. informovat personál závodu
 - b. zaznamenat údaje o ventilátoru a textilních vyústkách
 - c. příprava zařízení masokombinátu pro měření
 - d. umístění měřicího přístroje, nastavení přístroje
 - e. zjištění teploty vzduchu
 - f. spustit měření
 - g. zaznamenat:
 - i. čas měření
 - ii. použité měřicí přístrojové vybavení
 - iii. popis vzduchotechnického zařízení
 - iv. provozní podmínky během měření
 - v. zjistit běžný režim ventilátoru
 - h. fotodokumentace
6. pověření technika o zjištění zanešení vyústek při jejich čištění, fotodokumentace
7. uskutečnit měření č. 2 (viz bod 5)

8.3 Současný stav

V chladírně expedovaného masa je pro zajištění chlazení nainstalováno 10 přístěnných výparníků ve dvou symetrických řadách s označením 103A a 103B. Na každé stěně je 5 rovnoměrně umístěných výparníků, mezi nimiž je mezera 4,3 m.

8.3.1 Režim chodu vzduchotechniky

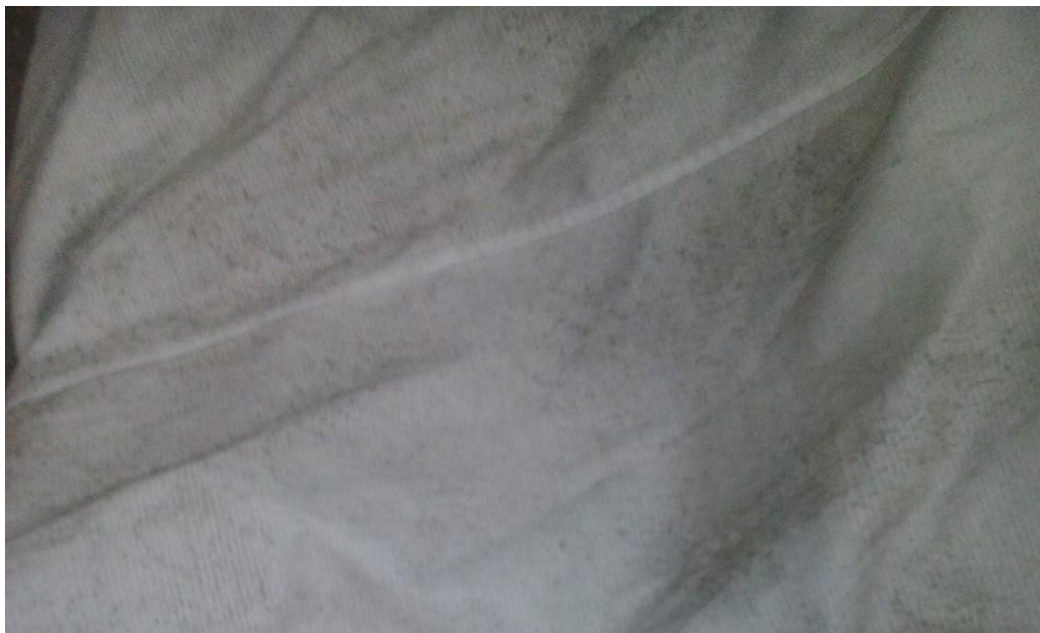
Vnitřní prostředí chladírny je definováno chodem přístěnných výparníků, čímž se kromě chlazení místnosti plní i funkce cirkulace vzduchu. Vnitřní teplota chladírny se může měnit v určitém teplotním intervalu. Požadované rozmezí teploty v místnosti je 2 – 4 °C. Obsluha velínu má možnost měnit požadovanou minimální, či maximální teplotu a upravovat tím rozmezí teplot uvnitř chladírny. Teplota místnosti je regulována spouštěním ventilátorů v přístěnných výparnících. Tím se chladný vzduch dostává přes propustné vyústky do prostoru celé chladírny. Skladování, či pohyb masa probíhá v chladírně celý den, proto je nutné zajištění optimálních teplot nepřetržitě. Fond pracovní doby chlazení je v objektu 8736 hodin.

Z denního trendu lze vyčíst počet spuštění ventilátoru výparníku, jedná se o počet horních amplitud vnitřní teploty zaznamenané v ovládacím softwaru. Počet spuštění ventilátorů se pohybuje mezi 35 – 45 v závislosti na ročním období. Režim chodu ventilace je dále upravován

nastavením celkového času chlazení a odtávání, tj. po 135 minutách chlazení je spuštěn režim odtávání, který trvá 20 minut.

8.3.2 Znečištění vyústky

Provozem ventilace se vnitřní část textilní vyústky zanáší prachem, který v hygienickém prostředí vzniká ve velmi malé míře. Sání cirkulujícího vzduchu nedisponuje filtrem, který by zvyšoval tlakovou ztrátu. Vzduch nasátý ventilátorem proudí přímo do vyústky, kde celým povrchem tkaniny prostupuje a šíří se dále do prostoru. Právě zde ulpívají částičky prachu na vnitřním povrchu a způsobují tenký film, který ovlivňuje proudění uvnitř vyústky (viz obr. 44).



Obr. 44: Znečištění vnitřního povrchu textilních vyústek před čištěním

8.3.3 Čištění vyústky

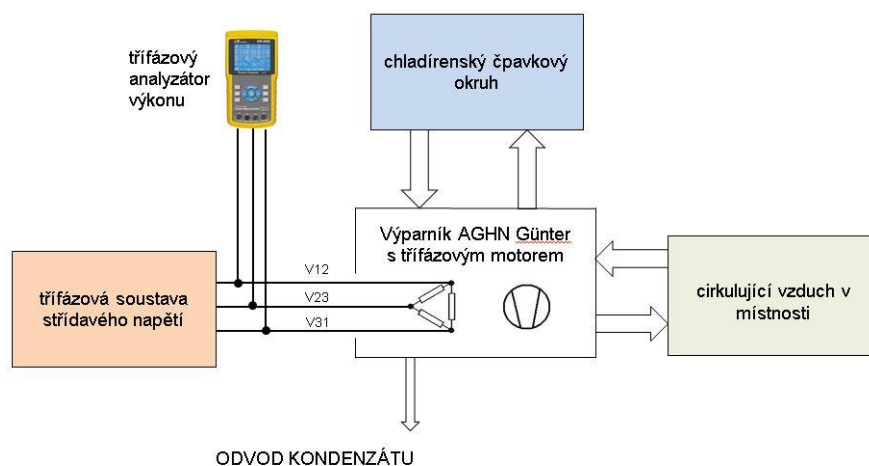
Vzhledem k charakteru znečištění je vhodnou variantou čištění vyústky praní v pračce prádla. Samotné praní probíhá v masokombinátu v půlročních intervalech. Vyústky jsou za asistence firmy demontovány z příruby výparníku a svěšeny. Následně jsou obráceny rubovou stranou, tak aby bylo umožněno účinné praní znečištěného povrchu tkaniny. Za použití běžných chemických pracích prášků jsou vyústky vyprány při teplotě 40 °C, vysušeny a poté znovu nainstalovány.

8.4 Měření příkonu

Pro porovnání energetických úspor po vyčištění textilního potrubí bylo zvoleno měření příkonu přístěnného výparníku pomocí digitálního analyzátoru výkonu. Výparník AGHN využívá elektrickou energii pouze pro provoz axiálního ventilátoru, pro odtávání námrazy je použito odtávání horkými parami, které neznamena další spotřebu elektrické energie.

8.4.1 Metoda měření

Přístěnný výparník je napájen třífázovou soustavou střídavého napětí. Zapojení v rozvodné skříni je realizováno tzv. do trojúhelníku. Při tomto zapojení lze měřit příkon spotřebiče zapojením jednotlivých fázových vodičů k digitálnímu analyzátoru výkonu, tak jak je znázorněno na obr. 45.



Obr. 45: Schéma měření příkonu ventilátoru

8.5 Měřicí přístroje

V rámci měření byly použity přístroje pro zaznamenání elektrického výkonu a teploty uvnitř místnosti.

Třífázový analyzátor výkonu LUTRON DW-6092 (obr. 42) s možností datového zápisu v reálném čase na SD paměťovou kartu a dobou vzorkování 2 s. Rozsah: 0 až 9,999 kW, Rozlišení: 0,001 kW, Přesnost $\pm (1\% + 0,008 \text{ kW})$.

Prostorový snímač teploty napojený na ovládací software se zobrazením aktuální vnitřní i venkovní teploty.

8.6 Podmínky měření

Měření příkonu bylo provedeno v souladu s plánem měření dne 9. 3. 2015 a následně dne 19. 3. 2015. V obou případech probíhala návštěva podniku včetně měření od 9:00 do 12:00.

Analýzátor výkonu Lutron byl spuštěn, byl nastaven název adresáře pro SD, datum měření a zvolen typ měření (3Φ3W). Za asistence elektrikáře byl analyzátor v rozvodně elektroinstalace připojen pomocí svorek a fázových kleští. Podmínky jednotlivých měření jsou uvedeny v tab. 14.

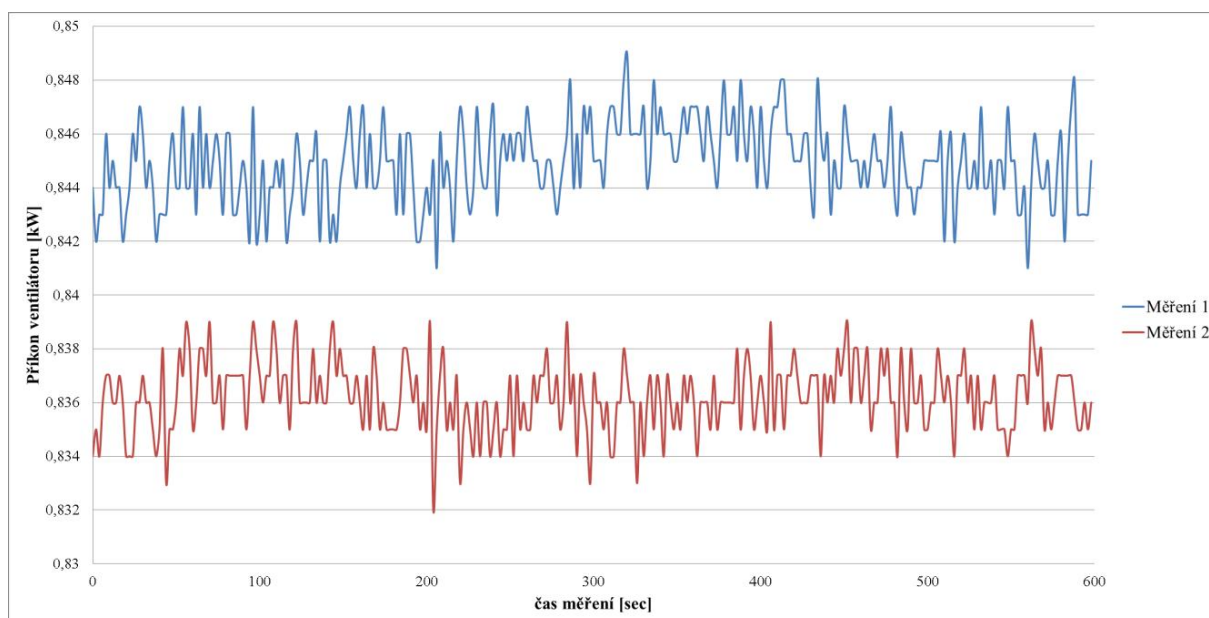
měření č. 1 9. 3. 2015	start	9:35
	délka měření	10 min
	konec	9:45
	teplota chladírny	3,5 °C
	venkovní teplota	8,2 °C
měření č. 2 19. 3. 201	start	9:37
	délka měření	10 min
	konec	9:47
	teplota chladírny	3,2°C
	venkovní teplota	11,5 °C

Tab. 14: Podmínky měření

8.7 Analýza výsledků

Je třeba brát v úvahu, že při opakování experimentálního měření s intervalem několika dnů nejsou podmínky měření zcela srovnatelné. Podmínky měření ovlivňuje zejména proměnná vlhkost vzduchu a teplota cirkulujícího vzduchu. Nestálost těchto parametrů se projevuje především změnou měrné hmotnosti vzduchu a tím i změnou objemového průtoku ventilátoru. Námraza lamel výparníku, kterými proudí vzduch je schopna negativně ovlivnit tlakovou ztrátu a zkreslit výsledky měření. Jak již bylo zmíněno, spuštěním odtávání výparníku před měřením se námraza odstraňuje, není však vyloučeno, že v některých místech může část námrazy zůstat.

Při porovnání naměřených hodnot je v grafu (obr. 46) viditelná změna příkonu ventilátoru, která se po celou dobu měření pohybuje v rádech několika wattů. Celková délka každého měření byla 10 minut, během které bylo zaznamenáno 600 hodnot.



Obr. 46: Měřená časová závislost příkonu ventilátoru VT01243

Pro statistické zpracování naměřených hodnot (tab. 15) byl použit software MS Excel. Výsledný odhad střední hodnoty měření je $0,845 \pm 0,001$ kW pro měření č. 1 a $0,836 \pm 0,001$ kW pro měření č. 2.

	měření č. 1	měření č. 2	jednotka
maximální příkon [kW]	0,849	0,839	
minimální příkon [kW]	0,841	0,832	
aritmetický průměr	0,845	0,836	kW
rozptyl	2,205E-06	1,634E-06	kW ²
směrodatná odchylka	0,001	0,001	kW
modus	0,845	0,836	kW
medián	0,845	0,836	kW
variační koeficient	0,176	0,153	%

Tab. 15: Statistické zpracování naměřených hodnot příkonu ventilátoru

8.8 Ekonomické porovnání spotřeby elektrické energie

Pro porovnání energetické náročnosti ventilátorů, resp. vzduchotechniky v chladírně 103 byl použit výpočet roční spotřeby elektrické energie. Tento výpočet byl proveden pro variantu pravidelného čištění potrubí dvakrát v roce a pro variantu pouze jednou za rok.

příkon 1 ventilátoru před čištěním $P_p = 0,845$ kW

příkon 1 ventilátoru po čištění $P_p = 0,836$ kW

Z denního trendu vnitřních teplot chladírny lze vyčíst denní počet sepnutí ventilátoru. Při sepnutí ventilátoru začne proces chlazení a teplota chladírny klesá. Denní frekvence počtu sepnutí však není konstantní a mění se s venkovní teplotou, v létě je frekvence vyšší, tak aby byly pokryty teplotní zisky získané z okolí, v zimě naopak nižší. Z archivu zaznamenaných teplot bylo pro letní období (květen – říjen) a zimní období (listopad – duben) odhadnut počet sepnutí ventilátoru a průměrná doba chodu. Následně lze vypočítat denní pracovní chod v zimním a letním období jako:

$$T_{den} = \frac{S_p \cdot t_{prum}}{60} \quad (8.1)$$

kde: T_{den} : denní pracovní fond ventilátoru [h]

S_p : denní počet sepnutí ventilátoru [-]

t_{prum} : průměrná doba chodu ventilátoru [min]

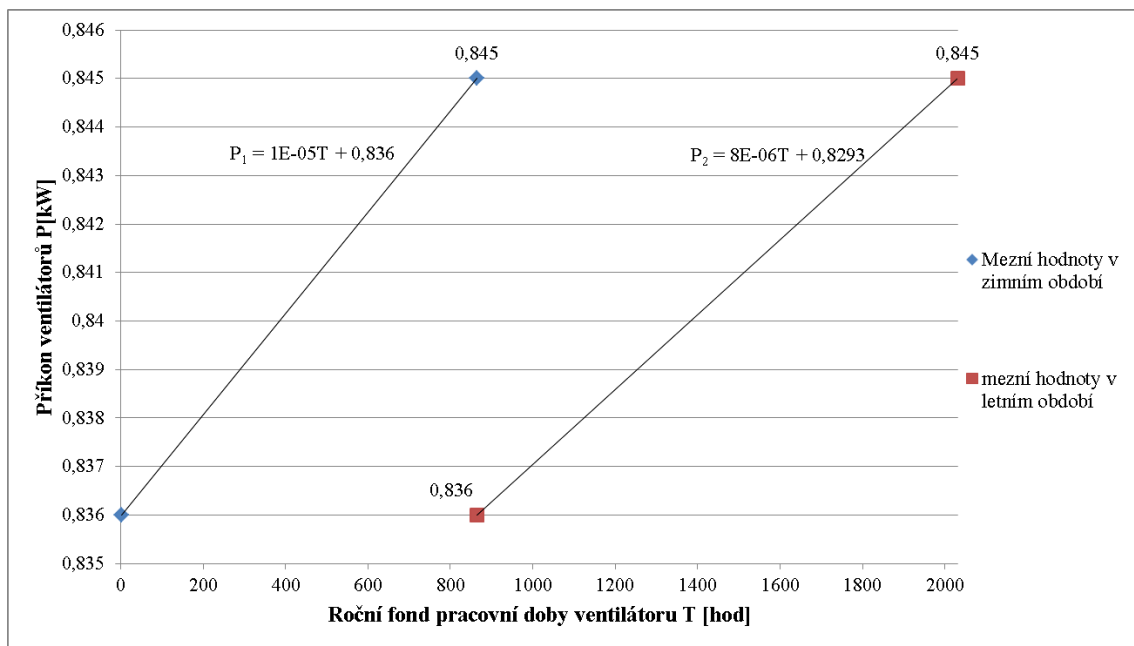
Celoroční pracovní fond T_{rok} je pak vyjádřen jako součet denních pracovních fondů, resp. sezonních pracovních fondů T_{let} letní a T_{zim} zimní. Zimní období obsahuje 182 pracovních dní a letní období 183 dní.

	zimní období	letní období
denní počet sepnutí ventilátoru S_p	38	45
průměrná délka běhu t	7,5 min	8,5 min
denní pracovní fond ventilátoru T_{den}	4,75 hod	6,38 hod
sezonní pracovní fond T_{zim}, T_{let}	865 hod	1167 hod
celoroční pracovní fond T_{rok}	2031 hod	

Tab. 16: Pracovní fond ventilace chladírny 103

8.8.1 Výpočet pro půlroční čištění

Pro provoz s půlročním intervalem čištění je uvažováno lineární zanášení potrubí s mezními hodnotami příkonu 0,845 a 0,836 kW v letním i zimním období (viz tab. 15). Mezní hodnoty příkonu jsou použity z výsledků měření. Lineární závislost je vyjádřena funkcí $P=f(T)$, jejíž rovnice je zobrazena na obr 47. Rovnice byla použita pro výpočet spotřeby elektrické energie pomocí integrace.



Obr. 47: Uvažovaný trend vývoje příkonu pro půlroční čištění

Spotřeba elektrické energie ventilátoru je vyjádřena jako práce vykonaná elektrickou energií v sezonních obdobích.

$$dW = P(T)dT$$

$$W = \int_{T_1}^{T_2} P(T)dT$$

kde: T_1 : začátek sledovaného úseku [h]

T_2 : konec sledovaného úseku [h]

Výpočet elektrické práce bude vypadat následovně:

$$W_{zim} = \int_0^{864} (0,00001T + 0,836)dT = [0,000005T^2 + 0,836T]_0^{864} = \mathbf{726,5 \text{ kWh}}$$

$$W_{let} = \int_{865}^{2031} (0,000008T + 0,8293)dT = [0,000004T^2 + 0,8293T]_{865}^{2031} = \mathbf{980,5 \text{ kWh}}$$

Celková spotřeba elektrické energie během celého roku je:

$$W_{\text{rok1}} = 726,5 \text{ kWh} + 980,5 \text{ kWh} = \mathbf{1706,9 \text{ kWh}}$$

8.8.2 Výpočet pro roční čištění

Jelikož naměřené údaje jsou platné pro půlroční interval čištění, je obtížné predikovat postup dalšího zanášení vzduchovodu a jeho vliv na příkon ventilátoru. Pro orientační odhad spotřeby elektřiny lze použít provoz při konstantním zanesení vzduchovodu, které nastane po půlročním provozu. Příkon ventilátoru po půlročním provozu P_{p1} je naměřený příkon těsně před čištěním a jeho hodnota je brána jako průměrná hodnota příkonu celoročně. Zmíněné zjednodušení nám dovoluje výpočet celkové spotřeby elektrické energie pomocí sezonních pracovních fondů.

$$W_{\text{rok2}} = W_{\text{zim}} + W_{\text{let}} = P_{p1} \cdot T_{\text{zim}} + P_{p1} \cdot T_{\text{let}} = 0,845 \cdot 865 + 0,845 \cdot 1167$$

$$= \mathbf{1717 \text{ kWh}}$$

Při lineárním trendu zanášení by bylo možné odhadnout příkon ventilátoru po celoročním provozu bez čištění a integrací uvedenou výše spočítat celoroční spotřebu. Uvedený způsob je zjednodušený. Přesto je na jeho základě možné získat konkrétní představu o dosažitelných úsporách elektrické energie.

8.8.3 Ekonomické porovnání nákladů ventilátoru a ventilace chladírny

Výše uvedený výpočet nám dovoluje porovnat roční spotřeby elektrické energie pro měřený ventilátor. Pro porovnání náročnosti ventilace celé chladírny je nutno zahrnout veškeré instalované ventilátory V chladírně se nachází 10 instalovaných ventilátorů. Roční spotřeby ventilátorů jsou zobrazeny v tab. 17. Při ročním provozu ventilátoru je spotřeba s půlročním intervalem čištění o přibližně 10 kWh nižší, pro provoz celé chladírny je rozdíl necelých 100 kWh.

	půlroční čištění	roční čištění
roční spotřeba ventilace chladírny	17069 kWh	17170 kWh
roční spotřeba samostatného ventilátoru	1706,9 kWh	1717,0 kWh

Tab. 17: Odhad roční spotřeby elektrické energie pro ventilaci chladírny

Pro průmyslové podniky se cena energií liší od běžných uživatelů. Průměrnou cenu elektřiny pro průmyslové spotřebitele v členských zemích EU lze nalézt v databázi statistického úřadu Evropské unie (Eurostat) [48]. K výpočtu byla použita cena 1kWh = 0,1012 eur. Náklady spojené s provozem ventilátorů jsou v tab. 18. Při ročním provozu ventilace jsou náklady s půlročním intervalem čištění přibližně o 12 eur nižší.

	půlroční čištění	roční čištění	rozdíl
náklady na provoz ventilace chladírny	1727,4 eur	1737,6 eur	12 eur

Tab. 18: Odhad nákladů pro roční provoz ventilace chladírny

8.9 Vyhodnocení měření

Provoz vzduchotechniky je jedním z mnoha spotřebitelů elektrické energie v průmyslovém provozu. Při dlouhodobém proudění vzduchu potrubím se mohou vnitřní prostory vzduchotechnických zařízení zanášet prachem. Vzniklá vrstva znečištění ve vzduchovodech ovlivňuje proudění vzduchu uvnitř potrubí a může způsobit nežádoucí tlakové ztráty. Při použití textilních vyústek jsou však tlakové ztráty zanedbatelné a na provoz ventilátorů mají minimální vliv. Zjištěné úspory při čištění se pohybují v řádech několika wattů, což je ve srovnání s ostatními energetickými náklady zanedbatelné. Na základě měření byly stanoveny celoroční náklady na provoz ventilátoru a ventilace celé chladírny a odhadnuty potencionální úspory při změně intervalu čištění textilních vyústek.

Z pohledu technické náročnosti celého čištění a jeho minimálního vlivu na úspory by bylo vhodnější interval čištění v daném podniku prodloužit. Význam čištění je však důležitý z hlediska hygienického a to je v potravinářském provozu prioritou. Z tohoto důvodu je půlroční čištění vhodnější nežli roční.

9 ZÁVĚR

Předložená práce se zabývá problematikou zanášení vzduchotechnických potrubních tras a jeho vlivem na tlakovou charakteristiku potrubí a elektrickou spotřebu ventilátoru. V teoretické části byly uvedeny stávající předpisy, které určují kritéria při provozu VZT zařízení. Dále byla zaměřena pozornost na představení jednotlivých částí VZT jednotky a jejich vlivu na energetickou spotřebu. Důraz byl kladen na ventilátory a hodnocení dopravy vzduchu, pro které se používá především měrný příkon ventilátoru. Byly také představeny dostupné technologie čištění vzduchotechnických potrubí, které měl autor příležitost sledovat v reálném provozu během práce odborné čistící firmy.

Náklady pro dopravu vzduchu tvoří podstatnou část celkových energetických nákladů a s ohledem na neustálé zvyšování vnitřního komfortu budov lze předpokládat v budoucnu další růst souvisejících výdajů. Zanášení vzduchovodů má negativní vliv na tlakovou ztrátu v případě, že se mění průřez potrubí, tj. při výrazných vrstvách nánosů. Z hygienického hlediska je však nebezpečné veškeré znečištění vnitřního povrchu potrubí. Ukázalo se, že zanášení představuje reálný problém technického zařízení budov, který není v současné době stále koncepčně řešen. Byla provedena rešerše dostupné tuzemské literatury, která poukázala na absenci relevantních informací o zanášení VZT systémů.

Pro ověření vlivu čištění větracího zařízení byl vybrán průmyslový podnik a naplánována série měření. Měření v daném provozu ukázalo, že vliv zanešení v hygienickém provozu není z energetického hlediska významný a potenciální ekonomické úspory jsou ve srovnání s ostatními náklady zanedbatelné. Pro objektivnější hodnocení dopadů zanášení VZT systémů na ekonomiku jejich provozu by bylo vhodnější provést další měření v různých typech průmyslových provozů a akcentovat přitom ty, u nichž dochází k intenzivnímu zanášení.

Pro výpočtový nástroj hodnotící vliv znečištění potrubních tras na ekonomiku provozu VZT jednotky byla vypracována obsáhlá uživatelská příručka vhodná pro provozovatele větracích a klimatizačních zařízení a firmy pohybující se v oboru čištění VZT systémů. Námětem pro další vývoj nástroje je úprava zadávání parametrů znečištění, která by zohledňovala nerovnoměrné rozložení nánosů. Výpočtový nástroj by bylo také vhodné v budoucnu nabídnout formou webové aplikace, čímž by se zvýšila jeho dostupnost.

Pro výzkumné účely Laboratoře energeticky náročných procesů NETME Centra byla navržena zkonstruována měřicí vzduchotechnická trať, na které lze zkoumat vliv změny tlakových charakteristik potrubí na příkon ventilátoru. Byla popsána metoda měření s několika modifikacemi a předběžný průběh experimentu. Další krok by měl být uskutečnění samotného experimentu a vytvoření referenčního znečištění, které by lépe napodobilo zanešení, s nímž se lze setkat v praxi. Měřicí trať také v budoucnu poslouží pro laboratorní výuku studentů a pro ověření metod měření rychlosti proudícího vzduchu.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. DRKAL, F. LAIN, M. SCHWARZER, J. ZMRHAL, V. *Klimatizace a průmyslová vzduchotechnika*. Praha: ČVUT, 2009.
2. HIRŠ, J. GEBAUER, G. *Vzduchotechnika v příkladech*. Brno: CERM, 2006, 230 str s.. ISBN 80-7204-486-9.
3. GEBAUER, G. RUBINOVÁ O. HORKÁ, H. *Vzduchotechnika*. Brno: Vydavatelství ERA, 2007. ISBN 978-80-7366-091-8.
4. PAPEŽ, K. *Energetické a ekologické systémy budov 2, Vzduchotechnika, chlazení, elektroinstalace a osvětlení*. Praha: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03622-8.
5. WAGNEROVÁ, E. URÍČEK, D. *Priemyselná vzduchotechnika*. Prešov: Vydavateľstvo Michala Vaška Prešov, 2003. ISBN 80-7165-370-5.
6. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. The Inside Story: A Guide to Indoor Air Quality. In: *Office of Air and Radiation. Office of Radiation and Indoor Air* [online]. 22. April. 2009 [cit. 2015-březen-10]. Dostupné z: Dostupné z: http://www.fusionsvc.com/The_Inside_Story.pdf
7. GEBAUER, G. Formování vnitřního prostředí budov. In: *Časopis Stavebnictví* [online]. 2008 [cit. 2015-březen-28]. Dostupné z: Dostupné z: http://www.casopisstavebnictvi.cz/formovani-vnitriho-prostredi-budov_N1732
8. MATHAUSEROVÁ, Z. Kvalita vnitřního prostředí v našich předpisech - mikroklima. In: *TZB Info* [online]. 14. duben. 2005 [cit. 2015-březen-16]. Dostupné z: Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2470-kvalita-vnitriho-prostredi-v-nasich-predpisech-mikroklima>
9. POČINKOVÁ, M. ČUPROVÁ, D. RUBINOVÁ, O. *Úsporný dům*. Praha: CPRESS, 2012. ISBN 80-86517-96-9.
10. MATHAUSEROVÁ, Z. *Hygienické požadavky na vnitřní prostředí staveb*. 2522013. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/9595-hygienicke-pozadavky-na-vnitri-prostredi-staveb>.
11. CHYSKÝ, J. HEMZAL, K. *Větrání a klimatizace: technický průvodce*. Praha: Bolit, 1993. ISBN 80-901574-0-8.
12. SCHILD, P. MYSEN, M. TZB info. In: *Doporučení pro měrný příkon ventilátoru (SFP) a účinnost vzduchotechnických systémů* [online]. 14. duben. 2014 [cit. 2015-březen-16]. ISSN 1801-4399

13. MATZ, V. LOM, M. TZB info. In: *Model řízení vzduchotechnické jednotky* [online]. 22. duben. 2013 [cit. 2015-duben-09]. ISSN 1801-4399
14. ZMRHAL, V. DRKAL, F. *Větrání*. Praha: Česká Technika, nakladatelství ČVUT, 2013. ISBN 978-80-01-05181-8.
15. REMAK. In: *Sestavná jednotka AeroMaster XP, Obrázek ve formátu JPEG* [online]. 2015 [cit. 2015-květen-07]. Dostupné z: Dostupné z: <http://www.remak.eu/cs/produkt/aeromaster-xp>
16. ELEKTRODESIGN. In: *IJK 400/80-50 Univerzální regulační klapka, Obrázek ve formátu JPG* [online]. [cit. 2015-květen-03]. Dostupné z: Dostupné z: <http://www.elektrodesign.cz/web/cs/product/ijk-400-80-50-univerzalni-regulacni-klapka>
17. LINDAB. In: *Kruhové požární klapky CR60, Obrázek ve formátu JPG* [online]. [cit. 2015-květen-03]. Dostupné z: Dostupné z: <http://www.lindab.com/cz/pro/products/pages/cr60.aspx>
18. HEMERKA, J. Filtrace atmosférického vzduchu. In: *TZB Info* [online]. 31. srpen. 2009 [cit. 2015-duben-01]. ISSN 1801-4399
19. GARIJA. In: *Hi-Flo kapsový filtr, Obrázek ve formátu JPG* [online]. [cit. 2015-květen-03]. Dostupné z: Dostupné z <http://www.garija.cz/filtry/kapsove-a-kompaktni-filtry/hi-flo-kapsovy-filtr-21.html>
20. HEPAFILTRY. In: *Mikro AL, Obrázek ve formátu PNG* [online]. [cit. 2015-duben-25]. Dostupné z: Dostupné z http://hepafiltry.cz/wp-content/uploads/sites/4/img/hepa_filtr_ico_02.png
21. DRKAL, F. LAIN, M. SSCHWARZER, J. ZMRHAL, V. *Vzduchotechnika*. Praha: nakladatelství ČVUT, 2009.
22. HOVAL. In: *Rotary heat exchangers, Obrázek ve formátu PNG* [online]. [cit. 2015-květen-06]. Dostupné z: Dostupné z: <http://www.hoval-heatrecovery.com/website/uploads/images/05/340x/schnittzeichnung.png>
23. ENERGOEKONOM. In: *Radiální vysokotlaký ventilátor, Obrázek ve formátu JPG* [online]. [cit. 2015-duben-25]. Dostupné z: Dostupné z: <http://www.energoekonom.cz/produkty-hrd-2-3-t-detail-86>
24. ELEKTRODESIGN. In: *Požární axiální ventilátor potrubní, Obrázek ve formátu JPEG* [online]. [cit. 2015-duben-20]. Dostupné z: Dostupné z: <http://www.elektrodesign.cz/web/cs/product/thgt-2-500-6-22-ip55-pozarni-axialni-ventilator-potrubni>

25. EUROVENT. In: *Eurovent air handling units energy efficiency class fourth edition* [online]. 2012.
26. SCHILD, P. MYSEN, M. TZB Info. In: *Doporučení pro měrný příkon ventilátoru (SFP) a účinnost vzduchotechnických systémů – V.* [online]. 12. květen. 2014 [cit. 2015-květen-06]. ISSN 1801-4399
27. SCHILD, P. MYSEN, M. TZB info. In: *Doporučení pro měrný příkon ventilátoru (SFP) a účinnost vzduchotechnických systémů – IV.* [online]. 5. květen. 2014 [cit. 2015-březen-16]. ISSN 1801-4399
28. ELEKTRODESIGN VENTILÁTORY S.R.O. Elektrodesign. In: *Teorie, vztahy a vzorce, Všeobecné informace* [online]. 2013 [cit. 2015-březen-18]. Dostupné z: <http://www.elektrodesign.cz/web/download/29824>
29. RUBINA, A. RUBINOVÁ, O. TZB info. In: *Vzduchotechnika v energetickém hodnocení budov* [online]. 7. září. 2009 [cit. 2015-březen-26]. ISSN 1801-4399
30. CIHELKA, J. *Vytápění a větrání*. Praha: SNTL Nakladatelství technické literatury, 1969.
31. ŠPINAR, B. *Vzduchotechnická zařízení: Základy proudění*. Praha: Vydavatelství PRÁCE, 1958.
32. ŠOB, F. *Hydromechanika*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008. ISBN 978-80-214-3578-0.
33. ŠTEFAN, D. *Hydraulické ztráty v potrubí*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství: Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Rudolf, Ph.D. 200940.
34. HYDRAULICS & PNEUMATICS. *Hydraulics & Pneumatics*. In: *The inside story on hydraulic flushing* [online]. 27. June. 2006 [cit. 2015-duben-15]. Dostupné z: <http://hydraulicspneumatics.com/200/TechZone/HydraulicFilter/Article/False/21524/TechZone-HydraulicFilter>
35. JANALÍK, J. ŠOB, P. *Mechanika tekutin*. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA: Fakulta strojní katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik,Stava-MechanikaTekutin.pdf>.
36. PASANEN, P. HOLOPAINEN, R. MULLER, B. *Proceeding of Clima WellBeing Indoors*. In: *Cleanliness of ventilation systems - a REHVA guidebook* [online]. 2007 [cit. 2015-duben-22]. Dostupné z: http://vzduchovody.cz/proces/cisteni_vzduchotechniky_rehva.pdf
37. SANTAMOURIS, M. WOUTERS, P. *Building Ventilation: The State of the Art*. London: Routledge, 2006. ISBN 10 1-84407-130-8.

38. BOTT, T. R. *Fouling of Heat Exchangers*. Amsterdam: Elsevier Science B.V. 1995.
39. BLUYSSSEN, P. Building and Environment. In: *Why, when and how do HVAC systems pollute the indoor environment and what to do about it?* [online]. 2003 [cit. 2015-květen-12]. Dostupné z: Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132302000586>
40. NADCA – NATIONAL AIR DUCT CLEANERS ASSOCIATION. *NADCA Standard pro vyhodnocování, čištění a renovaci systému VZT*. New Jersey: 2012.
41. TZB INFO. In: *Vzduchovody odpadního vzduchu, Obrázek ve formátu JPEG* [online]. 6. březen. 2009 [cit. 2015-květen-01]. Dostupné z: Dostupné z: <http://forum.tzb-info.cz/docu/diskuze/1091/109167/0017001.jpg>
42. ALKION. In: *Systémové řešení pro čištění odtahů od NC strojů - případová studie, Obrázek ve formátu JPG* [online]. 27. srpen. 2014 [cit. 2015-květen-08]. Dostupné z: Dostupné z: http://www.alkion.eu/dokumenty/obrobna_studie_final_CZ.pdf
43. REHVA FEDERATION OF EUROPEAN HEATING, VENTILATION AND AIR CONDITIONING ASSOCIATIONS. *Guidebook Cleanliness of ventilation systems*. Brussel.
44. CADDYVAC. In: *Dyna Probe COMPLETE Airduct Cleaning Package, Obrázek ve formátu JPG* [online]. [cit. 2015-květen-10]. Dostupné z: Dostupné z http://surfisup-preview.com/caddy/wp-content/uploads/2013/09/dyna_probe_complete_big1.jpg
45. ALKION S.R.O. In: *Čištění VZT a odtahů* [online]. 2012 [cit. 2015-duben-20]. Dostupné z: Dostupné z: <http://www.alkion.eu/cz/cisteni-vzt-a-odtahu.htm>
46. TROCKENEIS-SHOP. In: *Trockeneis Nuggets, Obrázek ve formátu JPEG* [online]. [cit. 2015-květen-15]. Dostupné z: Dostupné z http://trockeneis-shop.de/wp-content/uploads/wpsg_produktpbilder/2/nuggets02_web.jpg
47. ARIJAYA. In: *LUTRON DW-6093 3 Phase Power Analyzer, Obrázek ve formátu JPG* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: Dostupné z: http://www.arijaya.com/index.php?route=product/product&product_id=381
48. EUROSTAT *Ceny elektřiny pro průmyslové spotřebitele* [online]. 5. květen. 2015. Dostupné také z: Dostupné z: <http://apl.czso.cz/pll/eutab/html.h?ptabkod=ten00114#aV>

11 SEZNAM ZKRATEK

ZZT: Zpětné získávání tepla

EPA: Environmental Protection Agency

TZB: Technické zařízení budov

ALP: Aluminum Preinsulated Air Ducts

HEPA: High Efficiency Particulate Air filter

ULPA: Ultra Low Penetration Air filter

12 SEZNAM SYMBOLŮ

Symbol	Definice	Jednotka
Δp_{tr}	délkové ztráty třením	Pa
Δp_z	celková tlaková ztráta	Pa
Δp_{zm}	místní tlaková ztráta	Pa
D_h	hydraulický průměr	m
dv/dy	gradient rychlosti	$m \cdot s^{-1}/m$
g	gravitační zrychlení	$m \cdot s^{-2}$
h_1, h_2	polohová (potenciální) výška	m
k	absolutní drsnost	mm
k_r	relativní drsnost	-
l	délka potrubí	m
O	smáčený obvod	m
P	výkon ventilátoru	W
p, p_c	absolutní tlak vzduchu	Pa
p_d	dynamický tlak	Pa
P_p	příkon	W
P_{p1}	příkon ventilátoru po půlročním provozu	kW
q	měrná teplená zátěž od vnitřních zdrojů	W/m^3
q_m	měrná produkce tepla	$W \cdot m^{-2}$
q_v	celkové množství proudícího vzduchu	m^3/s
Q_{vi}	hmotnostní průtok	kg/s
r	měrná plynová konstanta	$J/(kg \cdot K)$
Re	Reynoldsovo číslo	-
R_h	relativní vlhkost	%
SFP	měrný příkon ventilátoru	$W/(m^3/s)$
S_i	plocha příčného průřezu	m^2
S_p	denní počet sepnutí ventilátoru	-
T	termodynamická teplota vzduchu	K
T_{den}	denní pracovní fond	hod
t_g	teplota vzduchu ve výši hlavy	$^{\circ}C$
T_{let}	letní pracovní fond	hod
t_o	operativní teplota vzduchu	$^{\circ}C$

t_{prum}	průměrná doba chodu ventilátoru	min
T_{rok}	celoroční pracovní fond	hod
T_{zim}	zimní pracovní fond	hod
V	objemový průtok	m^3/s
v_a	rychlost proudění vzduchu	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
v_s	střední rychlost v profilu	m/s
W	elektrická práce	kWh
$W_{\text{rok}}, W_{\text{zim}}, W_{\text{let}}$	spotřeba elektrické práce v období	kWh
Δp	celkový dopravní tlak	Pa
ζ	součinitel místní ztráty	-
η_{tot}	celková účinnost	-
λ	součinitel třecích ztrát	-
μ	součinitel dynamické viskozity	Pa s
ν	součinitel kinematické viskozity	m^2/s
ρ	hustota	kg/m^3
τ	tečné napětí	Pa

13 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 1: Rozdělení vzduchotechniky.....	13 -
Obr. 2: Vliv dílčích mikroklimat na celkovou úroveň vnitřního prostředí budov [7]	15 -
Obr. 3: Agencie vytvářející tepelně vlhkostní mikroklima	16 -
Obr. 4: Faktory podílející se na tvorbě vnitřního prostředí budov [9].....	17 -
Obr. 5: Rozdělení typické spotřeby energie v administrativní budově [12]	21 -
Obr. 6: Schéma modelu vzduchotechnické jednotky, upraveno dle [13]	22 -
Obr. 7: Klimatizační jednotka REMAK Aeromaster XP [15]	22 -
Obr. 8: Vícelistá regulační klapka [16]	23 -
Obr. 9: Kruhová požární klapka [17]	23 -
Obr. 10: Proudění volného izotermního proudu odváděcího a přiváděcího otvoru (kontury a vektory rychlostí) [14]	24 -
Obr. 11: Kapsový filtr pro filtraci třídy F6 až F9 [19].....	25 -
Obr. 12: Rámečkový HEPA filtr pro použití v čistých prostorech [20]	25 -
Obr. 13: Ohřev a chlazení vzduchu v h-x diagramu [1].....	26 -
Obr. 14: Rotační výměník tepla pro použití ve vzduchotechnice s proplachovací komorou [22]	27 -
Obr. 15: Deskový výměník tepla s křížovým prouděním [22]	27 -
Obr. 16: Radiální vysokotlaký ventilátor [23].....	28 -
Obr. 17: Axiální středotlaký požární ventilátor [24]	28 -
Obr. 18: Pracovní bod ventilátoru stanovený pomocí tlakových charakteristik [21]	30 -
Obr. 19: Křivky maximální účinnosti ventilátorů [27]	32 -
Obr. 20: Rychlostní profil laminárního a turbulentního proudění [21]	36 -
Obr. 21: Moodyho diagram, upraveno dle [34]	39 -
Obr. 22: Součinitel místní ztráty pro vybrané tvarové prvky (22)	40 -
Obr. 23: Tlakové poměry v potrubí s ventilátorem [21]	41 -

Obr. 24: a) Znečištění ohebné hadice odvodního vzduchovodu [41]	- 43 -
Obr. 25: Základní fáze zanášení [38]	- 44 -
Obr. 26: Zanešení odtahového potrubí obráběcích NC strojů [42]	- 45 -
Obr. 27: Referenční stupnice zanešení vzduchovodů (39).....	- 46 -
Obr. 28: Algoritmus ověřování čistoty (39)	- 46 -
Obr. 29: Schéma mechanického kartáčování s odsávacím ventilátorem, upraveno dle [36]-	47
-	
Obr. 30: Rotační kartáče pro čištění potrubí [44]	- 48 -
Obr. 31: Pelety suchého ledu [46]	- 49 -
Obr. 32: Čistící robot se zařízením na tryskání suchého ledu [45].....	- 49 -
Obr. 33: Pracovní prostředí výpočtového nástroje pro hodnocení vlivu znečištění VZT potrubí	- 52 -
Obr. 34: Schéma měřicí tratě.....	- 55 -
Obr. 35: Měřicí vzduchotechnická trať	- 56 -
Obr. 36: Krokové schéma měření	- 57 -
Obr. 37: Cejchovní křivka regulační clony	- 58 -
Obr. 38: Regulační clona Iris 200.....	- 59 -
Obr. 39: Ventilátor Dalap Turbine.....	- 59 -
Obr. 40: Spiro potrubí 200	- 60 -
Obr. 41: Měřicí přístroj TESTO	- 60 -
Obr. 42: Analyzátor výkonu LUTRON [47]	- 60 -
Obr. 43: Přístěnný výparník s axiálním ventilátorem, který je napojen na textilní vyústku	- 61 -
Obr. 44: Znečištění vnitřního povrchu textilních vyústek před čištěním.....	- 63 -
Obr. 45: Schéma měření příkonu ventilátoru	- 64 -
Obr. 46: Měřená časová závislost příkonu ventilátoru VT01243.....	- 65 -
Obr. 47: Uvažovaný trend vývoje příkonu pro půlroční čištění	- 67 -
Tab. 1: Produkce tepla metabolismu při různé činnosti (9)	- 16 -
Tab. 2: Předpisy stanovující limity pro faktory vnitřního prostředí [10].....	- 18 -
Tab. 3: Přípustné denní hodnoty mikroklimatických podmínek na pracovišti dle předpisu č. 361/2007 Sb.....	- 19 -
Tab. 4: Empirické hodnoty tlakové ztráty komponent pro velké budovy [26]	- 29 -
Tab. 5: Klasifikace měrného příkonu ventilátoru dle ČSN EN 13779	- 31 -
Tab. 6: Doporučené rychlosti proudění ve vzduchovodech podle typu objektu a umístění [14]- 37 -	
Tab. 7: Absolutní drsnosti stěn vzduchovodů [14].....	- 38 -
Tab. 8: Vliv významných faktorů na koncentraci usazených nečistot, upraveno dle [39] ..-	42 -
Tab. 9: Rozdělení typických druhů nečistot, upraveno dle [40].....	- 43 -
Tab. 10: Přijatelná úroveň čistoty v nově instalovaných vzduchovodech dle ČSN EN 15780 ..-	45 -
Tab. 11: Přijatelná úroveň čistoty v provozovaných vzduchovodech dle ČSN EN 15780..-	46 -
Tab. 12: Doporučené intervaly inspekce čistoty VZT potrubí [40].....	- 50 -
Tab. 13: Technické data měřených objektů.....	- 61 -

Tab. 14: Podmínky měření	- 65 -
Tab. 15: Statistické zpracování naměřených hodnot příkonu ventilátoru	- 66 -
Tab. 16: Pracovní fond ventilace chladírny 103	- 66 -
Tab. 17: Odhad roční spotřeby elektrické energie pro ventilaci chladírny	- 68 -
Tab. 18: Odhad nákladů pro roční provoz ventilace chladírny	- 68 -

14 SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA I: Uživatelská příručka výpočtového nástroje pro hodnocení vlivu znečištění potrubních tras

PŘÍLOHA II: Měření v provozu – nezkrácená verze