Doc. Ing. Jiří HEMERKA, CSc.,
Ing. Martin BRANIŠ,
Ing. Pavel VYBÍRAL, Ph.D.
ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
Ústav techniky prostředí

Ověření cyklónu jako třídiče PM_{10}

Check of Cyclone as Sorting Machine

Ústav techniky prostředí

Recenzent
Ing. Marcel Kadlec
Ing. Jiří Hejma, CSc.

Autoři článku se zabývají problematikou tříděného odběru vzorku emisí – frakce PM_{10}. Uvádějí výsledky ověřovacích měření cyklónu ϕ 78 mm jako třídiče PM_{10}. Na prašné zkušební trati byla zjištěna kriteriální závislost $Stk_m = f(Re)$, vyjadřující změnu odlučovacích schopností cyklónu na objemovém průtoku. Analýzou této závislosti bylo stanoveno, že u měření emisí tuhých částic lze v rozmezí běžných teplot 0 až 200 °C a běžných průtoků odsávaného vzorku 2 až 6 m^3/h použít cyklónu ϕ 78 mm jako třídiče PM_{10}.
Klíčová slova: *ochrana ovzduší, měření emisí, třídění, frakce PM_{10}, cyklón*

The authors of the article deal with the problems of sorted taking of emissions sample – PM_{10} fraction. They indicate the results of cyclone ϕ 78 mm checking measuring as PM_{10} sorting machine. On the dusty testing line the criteria dependence $Stk_m = f(Re)$ was found out which indicates the change of cyclone separation abilities depending on volumetric flow. By analysis of this dependence it was stated that it is possible to use cyclone ϕ 78 mm as PM_{10} sorting machine at emissions solid particles measuring in the range of common temperatures of 0 up to 200 °C and common flows of exhausted sample of 2 up to 6 m^3/h.
Key words: *atmosphere protection, emissions measuring, sorting, PM_{10} fraction, cyclone*

ÚVOD

Ochrana vnějšího ovzduší patří mezi základní cíle a úkoly ochrany životního prostředí. Po výrazném zlepšení stavu ovzduší v 90. letech dochází po roce 2000 ke stagnaci až mírnému zhoršování kvality ovzduší. Česká republika se úrovní znečištění ovzduší stále řadí k nejvíce znečištěným oblastem celé Evropy. Jak vyplývá ze Zprávy o životním prostředí za rok 2006 [1], zhoršení kvality ovzduší se týká zejména jemných prachových částic a emisí skleníkových plynů.

Koncentrace jemných prachových částic v ovzduší se u nás i ve světě vyjadřují ve formě frakce částic PM_{10} a $PM_{2,5}$. Frakce PM_{10}, resp. $PM_{2,5}$ jsou částice, které projdou při odběru vzorku velikostně – selektivním vstupním filtrem vykazujícím pro aerodynamický průměr 10 µm, resp. 2,5 µm odlučovací účinnost 50 %. Podle naší legislativy v ochraně ovzduší [2] je pro částice PM_{10} stanoven 24hodinový a roční imisní limit. U 24hodinového imisního limitu i povolená četnost překročení za rok. K překročení imisních limitů dochází právě u 24hodinové koncentrace PM_{10} a to na 29 % území státu, kde žije 62 % obyvatelstva [1].

V návaznosti na znečištění ovzduší jemnými prachovými částicemi, které představuje vysoké zdravotní riziko pro obyvatelstvo a prokázanou vazbu na zdroje znečišťování tuhých znečišťujících látek, narůstá potřeba zavedení do praxe **měření emisí s tříděným odběrem vzorků – měření frakce PM_{10}, případně frakce $PM_{2,5}$**. Současná legislativa v ochraně ovzduší, zaměřená na zdroje znečišťování, uvádí pouze emisní limity tuhých znečišťujících látek (TZL), tedy koncentrace všech tuhých částic, bez ohledu na jejich zrnitost.

Předkládaný příspěvek přináší informace o výzkumu **cyklónového třídiče**, který při odběru vzorků emisí při běžných odsávaných průtocích plynu a běžném rozsahu teplot třídí částice podle požadavku definice frakce PM_{10}. Výzkum probíhal na Ústavu techniky prostředí Fakulty strojní ČVUT v Praze jako součást řešení výzkumného záměru Technika životního prostředí, č. MSM6740770011.

NÁVRH CYKLÓNOVÉHO TŘÍDIČE

Při odběru vzorků tuhých částic z nosného plynu se třídič částic vkládá mezi odběrovou sondu a zachycovač – filtr. Úkolem třídiče je podle požadavku odloučit ze vzorku frakce určitých velikostí. Základní charakteristikou každého třídiče je závislost frakční odlučivosti O_f na velikosti částice a – závislost $O_f(a)$. Frakční odlučivost nabývá hodnot v intervalu od 0 do 1. Částice, která se zachytí s 50% odlučivostí, tedy částice, pro kterou platí $O_f(a) = 0,5$, se nazývá **mez odlučivosti a_m**. Zpravidla je požadavek na odloučení částic vyjádřen ve formě **aerodynamických velikostí částic a_1**. Aerodynamická velikost částice a_1 je velikost ekvivalentní kulové částice s hustotou materiálu částice 1000 kg/m³, která má stejné pohybové vlastnosti (pádová rychlost), jako částice skutečná. Pro aerodynamickou velikost částice, která se třídí s frakční odlučivostí $O_f = 0,5$, zavedeme označení **mez odlučivosti a_{1m}.**

U emisních měření lze jako třídič obecně použít buď **cyklón**, kde se částice třídí vlivem setrvačné síly, kterou je možno u spirálového proudu plynu válcovou i kuželovou částí cyklónu nahradit odstředivou sílou, nebo impaktor, kde k třídění dochází vlivem působení setrvačné síly. Pro cyklónový třídič hovoří zejména jeho jednoduchost při manipulaci, časová stálost třídění u dlouhodobějších odběrů vzorků, možnost jeho použití pro vysoké koncentrace částic a možnost využití záchytu v cyklónu pro další analýzy.

K ověřovacím zkouškám byl použit cyklón o vnitřním průměru $D = 78$ mm, který byl v předchozích letech navržen na Fakultě strojní ČVUT na základě požadavků praxe jako předodlučovač hrubých frakcí $a > 20$ µm v odebíraném vzorku emisí v předpokládaném rozsahu objemových průtoků od 3 do 6 m³/h a teploty plynu až 200 °C. Protože je proudění v cyklónech nesmírně složité a zejména u cyklónů malých průměrů pro měření emisí a imisí prakticky neexistuje žádná spolehlivá teorie odlučování částic, byl cyklón navržen dle dostupných experimentálních údajů [3] až [7].

Návrh hlavních rozměrů cyklónového odlučovače vycházel z předpokladu, že u geometricky podobných cyklónů jsou odlučovací schopnosti popsány kriteriální závislostí $O_f = f(Stk)$, kde O_f je frakční odlučivost a **Stk** je Stokesovo kritérium, které je rozhodujícím kritériem pro odlučování částic u vírových odlučovačů (cyklónů).
Stokesovo kritérium je definováno jako

$$Stk = \frac{a^2 \rho_č}{18\eta} \frac{v_D}{D} \qquad (1)$$

kde v_D (m/s) je fiktivní rychlost ve válcové komoře cyklónu o průměru D, tedy

$$v_D = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (2)$$

Pro velikost meze odlučivosti a_m označíme Stokesovo kritérium jako Stk_m, tj.

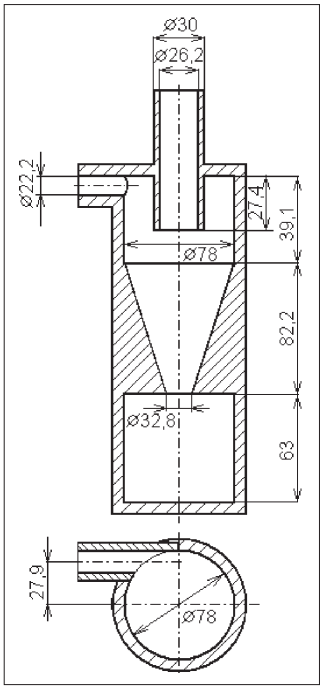
$$Stk_m = \frac{a_m^2 \rho_č}{18\eta} \frac{v_D}{D} \quad (3)$$

Vlastní návrh cyklónu vycházel z hodnoty Stk_m = 1,05 . 10^{-3}, uváděné u cyklónu typu SRI – I ([3] až [5]) a byl **navržen** z hlediska odlučování **pro nejnepříznivější případ** v uvedeném rozsahu průtoků, tedy pro V_{min} = 3 m³/h = 0,8333 l/s a nejnepříznivější teplotu 200 °C, pro výpočet vyjádřenou dynamickou viskozitu vzduchu η = 26,3 . 10^{-6} Pa.s. Z požadavku na odlučování hrubých frakcí a > 20 μm a tvaru závislosti O_f *(a)* byl odvozen požadavek na hodnotu meze odlučivosti a_m = 10 μm pro částice o hustotě $\rho_č$ = 2200 kg/m³.

Výpočtem ze vztahu (3) byl stanoven hlavní rozměr cyklónu, průměr *D* = 0,078 m. Ostatní rozměry cyklónu byly odvozeny z geometrické podobnosti od původních rozměrů cyklónu typu SRI – I.

Hlavní rozměry cyklónu jsou uvedeny na následujícím obr. 1.

Vstupní trubka do cyklónu má vnitřní průměr 22,2 mm, takže rychlost plynu na vstupu do cyklónu v předpokládaném rozsahu objemových průtoků od 3 do 6 m³/h je velmi nízká, v rozsahu 2,15 až 4,3 m/s, tedy pod minimální hodnotou dopravní rychlosti prachu (cca 10 m/s). Integrální součástí cyklónu je proto kuželový přechodový kus, který bezprostředně navazuje na vstupní trubku (dále viz popis u obr. 2) a minimalizuje délku úseku s nízkou rychlostí proudu.



Obr. 1 Hlavní rozměry cyklónu

CÍL MĚŘENÍ

Za předpokladu, že hodnota Stk_m je konstantní a nezávislá na změně objemového průtoku, vyjádřené hodnotou Reynoldsova čísla Re, vyplývá ze vztahů (2) a (3), že se zvyšováním objemového průtoku odsávaného vzorku V a snižováním teploty t, tj. snižováním viskozity η, se velikost meze odlučivosti a_m posouvá do nižších hodnot a tím se zlepšují odlučovací schopnosti cyklónu.

V souvislosti s uvedenými novými trendy a požadavky v oblasti měření emisí byl z praxe vznesen požadavek ověřit, **zda navržený cyklón průměr *D* = 78 mm vyhoví požadavkům pro třídění frakce PM_{10} v reálném rozmezí odsávaných objemových průtoků u emisních aparatur 2 až 6 m³/h a teplot plynu u emisí do cca 200 °C**.

Toto zadání je z hlediska odlučování poněkud jiný požadavek, než u původního zadání, neboť nyní se požaduje zjistit, **zda cyklón v reálném rozmezí odsávaných objemových průtoků a teplot plynu dosahuje frakční odlučivosti 0,5 pro aerodynamickou velikost částice $a_{1,m}$ = 10 μm s hustotou $\rho_č$ = 1000 kg/m³**.

Jako způsob řešení bylo zvoleno experimentální stanovení kriteriální závislosti $Stk_m = f$ (Re) a analýza této závislosti z hlediska požadavku dosažení $a_{1,m}$ = 10 μm.

EXPERIMENTÁLNÍ TRAŤ A METODA MĚŘENÍ

Experimenty byly uskutečněny na vodorovné prašné zkušební trati o vnitřním průměru d = 97 mm, délky 4 m. Podávací zařízeni na vstupu do zkušební trati se skládá z vibračního korýtkového podávače Fritsch, odkud prach vstupuje přes homogenizační válec do směšovacího ejektoru. Difuzor ejektoru je zaústěn do osy vstupního kuželového směšovacího kusu, kde se koncentrovaná prachová směs intenzivně směšuje se vzduchem přisávaným z laboratoře do vlastní zkušební trati. Směšovací ejektor pracuje při provozním přetlaku stlačeného vzduchu 0,4 MPa. Na konci horizontálního úseku trati je zařazen oblouk 90°, za kterým navazuje 1,5 m vertikální úsek, napojený přes další oblouk na hadicový filtr Alfa-Jet o filtrační ploše 60 m². Výstup z filtru je kruhovým potrubím napojen na radiální vysokotlaký ventilátor vybavený frekvenčním měničem otáček.

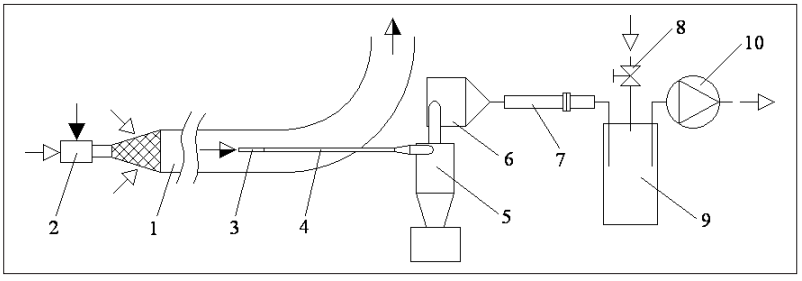
Jako zkušební prach se používají dva různě vytříděné elektrárenské popílky o hmotnostním mediánu 9 a 12 μm, označené jako C1 a F3. Koncentrace prachu se v závislosti na průtoku vzduchu tratí pohybuje v rozmezí 0,5 až 2 g/m³.

Metoda měření odlučovacích schopností cyklónu je založena na izokinetickém odběru vzorku aerodisperzní směsi z osy kanálu o požadovaném objemovém průtoku a následném stanovení celkové odlučivosti cyklónu O_c a stanovení závislosti frakční odlučivosti na velikosti částice O_f (*a*) na základě granulometrických analýz příslušných vzorků částic u cyklónu – blíže viz následující kapitola. Série experimentů, proměřená v požadovaném rozsahu objemových průtoků cyklónem, pak umožní stanovení kriteriální závislosti $Stk_m = f$ (Re).

Pro účely odběru vzorku aerodisperzní směsi z osy kanálu je testovaný cyklón vybaven přímou odběrovou sondou délky 400 mm o vnitřním průměru 9,5 mm, která je na vstupní trubku do cyklónu napojena přes kónický přechodový kus. Na konec sondy je napojena odběrová hlavice sondy délky 100 mm s vnitřním průměrem 9,5 mm a průměrem ústí 8,0 mm. Schéma měřicí tratě a odběru vzorku je uvedeno na obr.2.

Odběrová sonda s hlavicí je prostrčena koncovým obloukem horizontální prašné trati, ústí odběrové sondy se nachází v ose kanálu v dostatečné vzdálenosti před obloukem, kde ještě není narušeno proudění.

Rychlost v místě odběru se během odběru kontroluje Prandtlovou trubicí umístěnou v referenčním bodě kanálu, dostatečně vzdáleném před odběrovým bodem sondy (cca 1 m). Během přípravných měření byla zjištěna vazba mezi rychlostí v kontrolním a odběrovém bodě, takže během odsávání je možno nepřímo kontrolovat okamžitou rychlost proudu v místě odběru vzorku.



Obr. 2 Schéma měřicí tratě a odběru vzorku

1 – trať o průměru 97 mm, 2 – směšovací ejektor, 3 – hlavice sondy, 4 – odběrová sonda, 5 – cyklón, 6 – zachycovač – koncový filtr, 7 – clonková trať, 8 – přisávací ventil, 9 – uklidňovací nádoba, 10 – vývěva

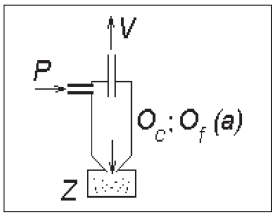
Vlastní odběrová trať (obr. 2) se skládá z odběrové sondy s hlavicí, testovaného cyklónu napojeného krátkým spojovacím kusem na koncový filtr, vybavený filtračním papírem ze skelných vláken a kalibrované měřicí clonkové trati pro malá Reynoldsova čísla o vnitřním průměru 26 mm, vybavené čtvrtkrukovou dýzou o jmenovitém průměru 9 mm. Clonková trať je napojena přes přisávací ventil a uklidňující nádobu na lamelovou vývěvu Becker.

Měření příslušných veličin a regulace odsávaného množství při změně tlakové ztráty filtru je standardní pro laboratorní měření.

Při použití odběrové sondy s hlavicí ϕ 8 mm odpovídá předpokládanému rozsahu průtoků cyklónem 2 až 6 m^3/h rychlost v ose kanálu a v ústí sondy (izokinetické odsávání) v rozsahu cca 11 až 33 m/s.

METODA STANOVENÍ FRAKČNÍ ODLUČIVOSTI

Na obr. 3 je znázorněno schéma cyklónu jako třídiče tuhých částic. Označme *P* přívod do cyklónu, *Z* záchyt v cyklónu a *V* výstup z cyklónu. Částice vstupující do cyklónu se v cyklónu buď odloučí a dostanou se do záchytu nebo cyklónem proniknou a dostanou se do výstupu. Mezi přívodem, záchytem a výstupem platí jednoduché bilanční vztahy.



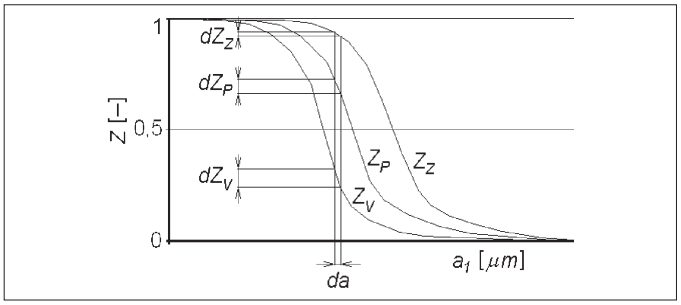
Obr. 3 Schéma cyklónu jako třídiče tuhých částic

Pro celkové hmotnostní toky částic platí vztah

$$\dot{M}_P = \dot{M}_V + \dot{M}_Z \tag{4}$$

Vyjádříme-li dle obr. 4 u cyklónu odpovídající zrnitosti částic křivkami zbytků $Z_P\ (a)$, $Z_V\ (a)$ a $Z_Z\ (a)$, potom pro frakční hmotnostní toky částic v intervalu velikostí (*a, a + da*) platí bilanční vztah

$$\dot{M}_P dZ_P(a) = \dot{M}_V dZ_V(a) + \dot{M}_Z dZ_Z(a) \tag{5}$$



Obr. 4 Křivky zbytků částic v přívodu, záchytu a výstupu

Celková odlučivost O_c je definována jako poměr celkových hmotnostních toků v záchytu a přívodu

$$O_c = \frac{\dot{M}_Z}{\dot{M}_p} \tag{6}$$

a frakční odlučivost O_f částic v intervalu velikostí (*a, a + da*) jako poměr frakčních hmotnostních toků v záchytu a přívodu, tedy

$$O_f = \frac{\dot{M}_z dZ_z}{\dot{M}_p dZ_p} = O_c \frac{dZ_z}{dZ_p} \tag{7}$$

Hledanou závislost frakční odlučivosti na velikosti částice $O_f\ (a)$ je možné stanovit více způsoby. Jedním z nich je dle vztahu (7), kde je nutná znalost celkové odlučivosti O_c a křivek zbytků $Z_P\ (a)$ a $Z_Z\ (a)$. Tato alternativa (metoda přívod – záchyt) však není vhodná u experimentů, kde se dosahuje vyšších hodnot celkové odlučivosti O_c a křivky zbytků $Z_P\ (a)$ a $Z_Z(a)$ jsou si blízké. Navíc vzorek prachu ke stanovení křivky zbytků $Z_P\ (a)$ není přímo k dispozici, neboť zrnitost prachu v přívodu nemusí být shodná se zrnitostí podaného prachu a stanovení křivky zbytků $Z_P\ (a)$ by vyžadovalo samostatný izokinetický odběr vzorku z osy kanálu. Pro naše zkušební prachy, kde se u experimentu vykazují vyšší hodnoty celkové odlučivosti O_c, je vhodnější použít alternativu s použitím vzorků částic v záchytu a ve výstupu.

Z bilance frakčních hmotností lze pro výpočet metodou záchyt – výstup odvodit vztah

$$\frac{O_f}{1-O_f} dZ_V = \frac{O_c}{1-O_c} dZ_Z \tag{8}$$

Úpravou vztahu (8) získáme vyjádření frakční odlučivosti O_f ve tvaru

$$O_f = \frac{\frac{O_c}{1-O_c} dZ_Z}{dZ_V + \frac{O_c}{1-O_c} dZ_Z} = \frac{\frac{O_c}{1-O_c} \Delta Z_Z}{\Delta Z_V + \frac{O_c}{1-O_c} \Delta Z_Z} \tag{9}$$

Ve vztahu (9) je u druhého zlomku již nahrazen diferenciální vztah vztahem diferenčním, kde hodnoty diferencí u příslušných křivek zbytků ΔZ_Z a ΔZ_V odpovídají zvolenému velikostnímu intervalu Δa.

Výhodou metody záchyt – výstup je skutečnost, že u větších částic, kde se dle obr. 4 hodnota ΔZ_V blíží k nule, se hodnota frakční odlučivosti O_f dle vztahu (9) blíží k jedné, tedy k hodnotě, která se u odstředivého odlučovacího principu teoreticky očekává.

U vlastních experimentů je doba měření přizpůsobena požadavku zajištění dostatečných hmotností prachu ve výsypce cyklónu (v záchytu) i hmotnosti prachu zachyceného v koncovém filtru (výstupu) a to nejenom z hlediska přesnosti vážení, ale i reprezentativnosti vzorku u následné analýzy zrnitosti částic.

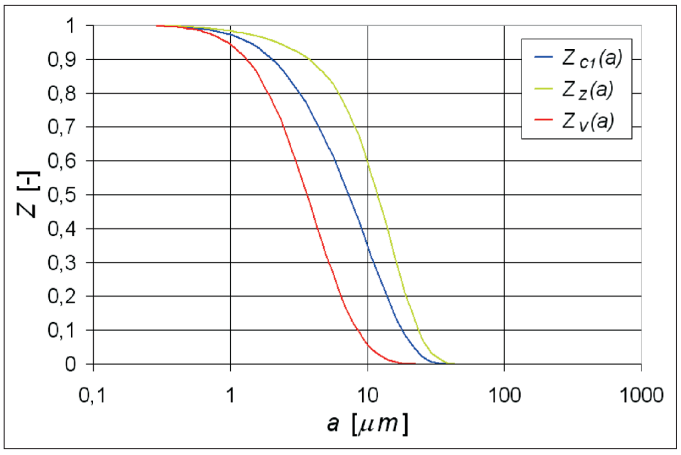
Analýzy zrnitosti částic se provádějí na laserovém analyzátoru Fritsch Analysette 22, který zatřiďuje částice do 62 velikostních intervalů v rozmezí velikostí částic 0,3 až 300 μm a zjištěné rozdělení velikostí částic dle počtu se přepočítává na požadované rozdělení dle hmotnosti.

MĚŘENÍ A VÝSLEDKY

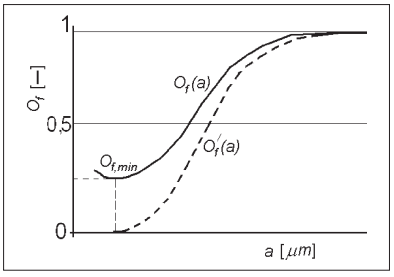
Po úvodních dvou sériích měření, jejichž cílem bylo osvojení metody měření, bylo v rozmezí objemových průtoků 2 až 6 m^3/h celkem měřeno 14 krát v několika etapách (sériích). Čísla jednotlivých měření jsou určena podle jednoduchého klíče, kde prvé dva znaky označují použitý zkušební prach (F3 nebo C1), další dva znaky etapu (sérii) měření a poslední dva znaky objemový průtok v m^3/h (viz dále tab. 1).

Základní sérii měření tvoří série 03, kde bylo s prachem F3 uskutečněno 5 měření v celém rozsahu objemových průtoků. Série 04 byla uskutečněna s jemnějším zkušebním prachem C1 pro ověření reprodukovatelnosti měření. S ohledem na horší reprodukovatelnost výsledků měření u minimálního objemového průtoku bylo měření při průtoku 2 m^3/h doplněno o další 3 měření (05, 06 a 07). Poslední série 08 byla uskutečněna při minimální koncentraci příměsí v kanálu na úrovni cca 500 mg/m^3.

Pro ilustraci rozdílů mezi křivkami zbytků $Z_V(a)$, $Z_Z(a)$ a podaného prachu $Z_{C1}(a)$ jsou na následujícím obr. 5 znázorněny tyto křivky u měření č. C1-06-02, kde byla zjištěna celková odlučivost O_c = 39,7 %.



Obr. 5 Křivky zbytků $Z_V(a)$, $Z_Z(a)$ a $Z_{C1}(a)$ u měření č. C1-06-02 při jmenovitém průtoku 2 m³/h



Obr. 6 Korekce závislosti $O_f(a)$

Měření, vyhodnocená metodou záchyt – výstup dle vztahu (9), vedou na tvar závislosti $O_f(a)$, uvedený na obr.6. V oblasti jemných částic, kde se u odstředivého odlučovacího principu předpokládá frakční odlučivost blížící se k nule, je u určité velikosti částice zjištěna určitá minimální nenulová hodnota $O_{f,min}$ a pro menší částice má závislost opačnou tendenci. Tuto nelogičnost lze vysvětlit hypotézou, že jemné částice cca pod 1 μm se v podávacím zařízení nedokonale rozptylují a ve zkušební trati se pohybují ve shlucích a z hlediska odlučování se chovají jako hrubší částice. U analýz zrnitosti vzorků částic se však vzorek prachu nejprve dezintegruje v ultrazvukové lázni a takto dokonale rozptýlený vstupuje do analýzy. V oblasti jemných částic tak není splněna podmínka rovnosti frakčních hmotnostních toků (5) a vyhodnocení měření v této oblasti velikosti částic vede k systematickým chybám. Tento fakt, známý u experimentů s podáváním zkušebního prachu, lze eliminovat korekcí zjištěné závislosti $O_f(a)$ dle vztahu

$$O'_f(a) = \frac{O_f(a) - O_{f,min}}{1 - O_{f,min}} \qquad (10)$$

kde $O'_f(a)$ je korigovaná závislost.

Jak již bylo uvedeno v předcházející kapitole, analýzy zrnitosti částic u analyzátoru Fritsch Analysette 22 se vyjadřují ve formě požadovaného rozdělení dle hmotnosti („mass distribution“). Velikost částice je vyjádřena ve formě optické velikosti částice, kterou lze u částic izometrických tvarů považovat za blízkou aerodynamické velikosti částice a se skutečnou hustotou částice $\rho_č$ (kg/m³).

Frakce částic PM_{10} i $PM_{2,5}$ jsou však vztaženy na **aerodynamické velikosti částice a_1** (kulové částice s hustotou $\rho_č$ = 1000 kg/m³) a proto je nutno u zjištěných zrnitostí, resp. závislosti $O_f(a)$, velikosti částic přepočítat dle vztahu

$$a_1 = a\sqrt{\frac{\rho_č}{1000}} \qquad (11)$$

Výsledky měření, po korekci dle vztahu (10) a přepočtu dle vztahu (11), jsou ve formě závislostí $O'_f(a_1)$ znázorněny na obr. 7.

Z průběhů závislostí $O'_f(a_1)$ je zřejmý základní vliv objemového průtoku cyklónem na hodnotu meze odlučivosti $a_{1,m}$ – skupina 5 měření v oblasti nejnižšího průtoku 2 m³/h s hodnotami $a_{1,m}$ v rozsahu cca 11,5 až 15 μm, osamocené měření při objemovém průtoku 3 m³/h s hodnotou $a_{1,m}$ = 9,3 μm, skupina 3 měření při průtoku 4 m³/h s hodnotami $a_{1,m}$ = 7 až 7,7 μm, dále osamocené měření při objemovém průtoku 5 m³/h s hodnotou $a_{1,m}$ = 6 μm a konečně skupina 3 měření s nejvyšším průtokem 6 m³/h s hodnotami $a_{1,m}$ kolem 5,5 μm.

Změnu třídicích schopností cyklónu s měnícím se objemovým průtokem lze zobecnit ve formě kriteriální závislosti Stk_m na Reynoldsově kritériu Re. Stokesovo kritérium Stk_m, vztažené na hodnotu meze odlučivosti $a_{1,m}$, se v souladu se vztahem (3) vyjádří s použitím objemového průtoku V jako

$$Stk_m = \frac{a_m^2 \rho_č}{18\eta}\frac{v_D}{D} = \frac{a_{1,m}^2 1000}{18\eta}\frac{v_D}{D} = \frac{a_{1,m}^2 1000}{18\eta}\frac{4V}{\pi D^3} \qquad (12)$$

a pro Reynoldsovo kritérium Re, vyjádřené s použitím objemového průtoku V, platí

$$Re = \frac{v_D D}{\nu} = \frac{v_D D\rho}{\eta} = \frac{4V\rho}{\pi D\eta} \qquad (13)$$

Ve vztazích (12) a (13) značí ρ [kg/m³] hustotu plynu (vzduchu) a η [Pa.s] dynamickou viskozitu plynu (vzduchu).

Výsledky měření, vyjádřené ve formě hodnot kritérií Stk_m a Re, jsou shrnuty v tab. 1 a ve formě závislosti Stk_m na Re jsou vyneseny na obr. 8.

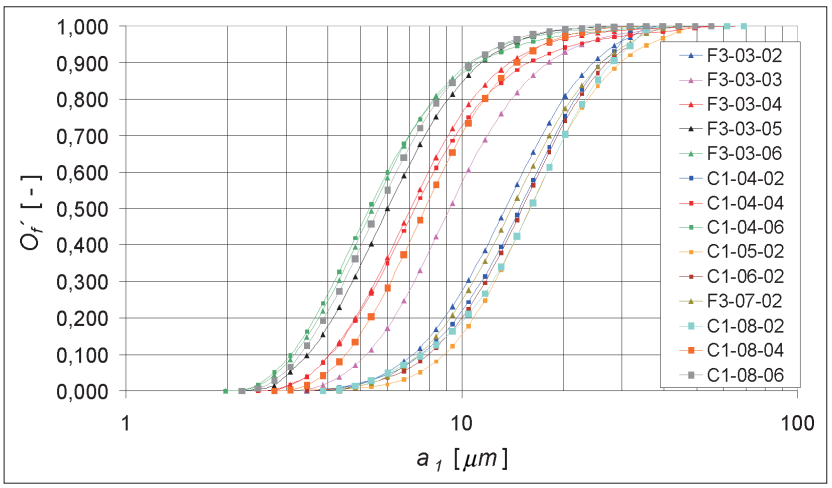
U minimálního objemového průtoku cyklónem 2 m³/h se u 6 měření projevuje určitý vliv použitého prachu na výsledky experimentů. S ohledem na nízký počet měření však tento rozdíl nelze statisticky vyhodnotit jako významný. Rovněž pozorovaný malý vliv koncentrace prachu u průtoků 2, 4 a 6 m³/h na výsledky měření není možno s ohledem na nízký počet uskutečněných měření hodnotit jako statisticky významný. Do výsledného zpracování výsledků měření byla proto zahrnuta všechna měření.

Zjištěnou závislost Stk_m na Re lze nejlépe vyjádřit funkční závislostí $Stk_m = f(Re)$ ve tvaru

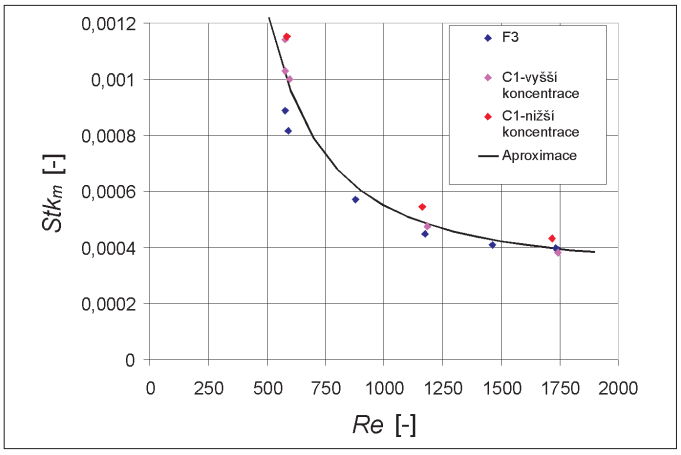
$$Stk_m = 0{,}00032 + 237 \cdot Re^{-2{,}0074} \qquad (14)$$

ANALÝZA VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ – CYKLÓN JAKO TŘÍDIČ PM10

Výsledky měření frakční odlučivosti cyklónu, zobecněné ve formě kriteriální závislosti (14), umožňují odpovědět na otázku, pro jaké teploty a pro



Obr. 7 Korigované závislosti $O'_f(a_1)$ u měření



Obr. 8 Závislost Stk_m *na* Re

jaké průtoky lze daný cyklón použít jako třídič PM_{10}. Dosadíme-li do vztahu (14) za Stk_m a Re ze vztahů (12) a (13), získáme rozepsaný vztah

$$\frac{4V}{\pi D^3}\frac{a_{1,m}^2 1000}{18\eta} = 0{,}00032 + 237\left(\frac{4V\rho}{\pi D\eta}\right)^{-2{,}0074} \qquad (15)$$

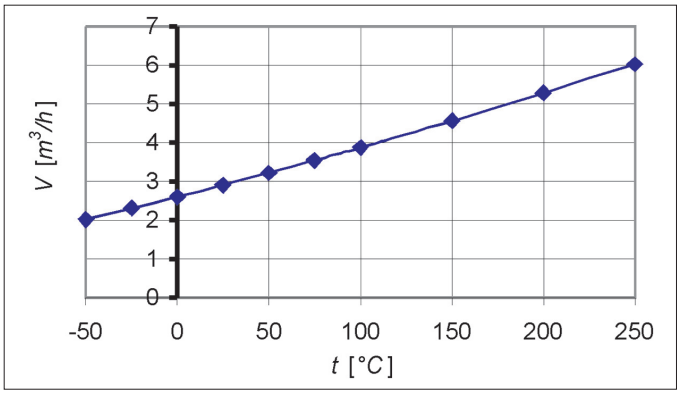
V tomto vztahu se nacházejí veličiny ρ a η, které jsou závislé na složení plynu, hustota ρ je dále závislá na stavových veličinách (teplota a tlak) a dynamická viskozita η je funkcí teploty. U dalšího zpracování výsledků budeme předpokládat, že plyn je suchý vzduch a použijeme běžných vztahů pro vyjádření závislosti $\rho = f(p,t)$ a $\eta = f(t)$. Výpočet provedeme pro standardní tlak 98 kPa tak, že za $a_{1,m}$ dosadíme hodnotu 10.10^{-6} m a iterací získáme závislost objemového průtoku vzduchu V na teplotě vzduchu t, pro kterou je možné cyklón použít jako třídič PM_{10} při tlaku 98 kPa. Závislost je zobrazena na obr. 9. a lze ji aproximovat polynomem 2. stupně ve tvaru

$$V = 7\cdot 10^{-6}t^2 + 0{,}012t + 2{,}61 \qquad (16)$$

ZÁVĚR

Na prašné zkušební trati byla experimentálně zjištěna kriteriální závislost $Stk_m = f(Re)$ ve tvaru vztahu (14) udávající, jak se mění třídicí schopnosti cyklónu, vyjádřené hodnotou Stokesova čísla Stk_m, na objemovém průtoku plynu, vyjádřeném Reynoldsovým číslem Re.

Analýzou této závislosti bylo zjištěno, **že podle požadavků z praxe lze cyklón průměru *D* = 78 mm použít v rozmezí běžných teplot u emisních měření 0 až 200 °C a běžných průtoků odsávaného vzorku 2 až 6 m³/h jako třídič PM_{10}.**



Obr. 9 Závislost objemového průtoku V [m³/h] na teplotě vzduchu t [°C] pro cyklón D = 78 mm jako třídič PM_{10} *při tlaku 98 kPa – vztah (16)*

Tab. 1 Přehled uskutečněných měření a výsledky vyjádřené ve formě kritérií Stk_m a Re

Označení měření	Objemový průtok – jmen. hodnota [m³/h]	Použitý zkušební prach	Koncentrace prachu [mg/m³]	$Stk_m.10^4$ [1]	Re [1]
F3-03-02	2	F3	2025	8,15	590
F3-03-03	3	F3	1417	5,69	877
F3-03-04	4	F3	1168	4,48	1177
F3-03-05	5	F3	1193	4,08	1463
F3-03-06	6	F3	1433	3,97	1734
C1-04-02	2	C1	1844	1,00	597
C1-04-04	4	C1	1184	4,74	1185
C1-04-06	6	C1	1036	3,80	1744
C1-05-02	2	C1	1753	1,14	579
C1-06-02	2	C1	1746	1,03	579
F3-07-02	2	F3	2045	8,88	579
C1-08-02	2	C1	551	1,15	585
C1-08-04	4	C1	310	5,44	1161
C1-08-06	6	C1	248	4,31	1718

Konkrétní výpočet (předpokládán suchý vzduch a barometrický tlak 98 kPa) vede k závislosti $V = f(t)$ ve tvaru polynomu 2. stupně – vztah (16). Podle tohoto vztahu nebo dle závislosti na obr. 9 se požadovaný průtok vzduchu cyklónem V zvyšuje z hodnoty 2,6 m³/h při teplotě 0 °C na 5,3 m³/h při 200 °C.

Pro jiný plyn než suchý vzduch se použitelnost cyklónu jako třídiče PM_{10} liší od vztahu (16) a lze jej analogickým postupem jako u suchého vzduchu odvodit z kriteriálního vztahu (15) podle konkrétních závislostí $\rho = f(p,t)$ a $\eta = f(t)$ u daného plynu.

Lze konstatovat, že přes složitost dvoufázového měření a jeho vyhodnocení vykazují výsledky dobrou opakovatelnost (stejné podmínky experimentu) a při vyšších objemových průtocích i dobrou reprodukovatelnost. V oblasti minimálního průtoku jsou výsledky zatíženy větší chybou (směrodatná odchylka dosahuje cca 12,5 % příslušné střední hodnoty).

Výzkum je součástí řešení výzkumného záměru MSM 6740770011 Technika životního prostředí.

Kontakt na autora: jiri.hemerka@fs.cvut.cz

Použité zdroje:

[1] Zpráva o životním prostředí České republiky v roce 2006, MŽP ČR
[2] Nařízení vlády č. 597/2006 Sb. o sledování a vyhodnocování kvality ovzduší
[3] Smith, W.B., Wilson Jr., R.R.: A Five-Stage Cyclone System for in Situ Sampling, Environ. Sci. Technol., 12, No. 11, 1979, pp. 1379–1392.
[4] Smith, W.B., Parsons, C.T., Wilson Jr., R.R., Harris, D.B.: A Cascade Cyclone System for Measuring Particle Size and Concentration in Process Streams, Proceedings of the 9. GAeF conf. „Aerosols in Science, Medicine and Technology, Duisburg, 1981, pp. 224–230.
[5] Smith, W.B., Parsons, C.T., Wilson Jr., R.R., Harris, D.B.: A Five-Stage Cyclone System for Measuring Particle Size and Concentration in Process Streams, Journal of Aerosol Science, 13, No. 3, 1982, pp. 217–219
[6] Buttner, H.: Investigation on Particle Collection in Small Cyclones, Journal of Aerosol Science, 17, No. 3, 1986, pp. 537–541
[7] John W., Reischl, G.: A Cyclone for Size-Selective Sampling of Ambient Air, JAPCA, 30, No. 8, 1980, pp. 872–876. ■