

doc. Ing. Jiří HEMERKA, CSc.
Ing. Pavel VYBÍRAL, Ph.D.
Bc. Kristýna ŠVANDOVÁ
ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
Ústav techniky prostředí

Vývoj imisního třídiče PM₁₀

Development of the PM₁₀ Pollutants Separator

Recenzent
RNDr. Jan Hovorka, Ph.D.

Autoři se zabývají problematikou nízkoprůtokového tříděného odběru vzorku imisí – frakce PM₁₀. Popisují vývoj a výsledky ověřovacích měření cyklónu Ø73 mm s průměrem vstupní trubky 17,8 mm jako třídiče PM₁₀. Na prašné zkušební trati byly u cyklónu s různým nastavením vysunutí výstupní trubky v rozsahu 8 až 50 mm experimentálně stanoveny pro dva zkušební prachy korigované závislosti frakční odlučivosti na aerodynamické velikosti částice $O_f(a_p)$. Hodnota meze odlučivosti $a_{1,m}$ se pohybovala v rozsahu 8,1 až 10,8 µm. Na základě závislosti meze odlučivosti na vysunutí výstupní trubky $a_{1,m}(v)$ bylo stanoveno vysunutí výstupní trubky 45 mm, při kterém cyklón při objemovém průtoku 2,3 m³/h třídí podle požadavků frakce částic PM₁₀. V závěru jsou zdůrazněny výhody cyklónového třídiče v porovnání s běžně používanými impakčními třídiči pro použití u dlouhodobého imisního monitoringu frakce částic PM₁₀, tedy zejména provozní spolehlivost a vysoká hodnota provozní jímavosti.

Klíčová slova: ochrana ovzduší, měření imisí, frakce PM₁₀, odstředivý odlučovací princip, cyklón, frakční odlučivost

The authors deal with the issue of the low flow rate separative sampling of pollutants – fraction PM₁₀. They describe the development of a Ø73 mm cyclone with diameter of the inlet pipe 17.8 mm and results of measurements to validate it as a separator of the PM₁₀. Two corrected dependencies of the fractional separability on the aerodynamic particle size $O_f(a_p)$ have been experimentally determined on the test track, for the different extrusion of the cyclone outlet tube, in the range of 8-50 mm. The separability threshold value $a_{1,m}$ was in the range of 8.1 to 10.8 µm. Based on the dependence of the separability limit on the ejection of the outlet pipe $a_{1,m}(v)$, it has been determined the ejection of the outlet tube 45 mm, for which the cyclone at a volume flow rate 2.3 m³/h separates according to the requirements of the PM₁₀ fraction. In conclusion, it is highlighted the benefits of the cyclone separators for use in the long-term air pollution monitoring of the fraction PM₁₀ in comparison with the conventional impact separators, namely their operation reliability and high operation capacity.

Keywords: air pollution control, air pollution measurement, fractions PM₁₀, centrifugal separation principle, cyclone, fractional separability

ÚVOD

V současné době používaná staniční síť měření imisí v rámci Automatizovaného imisního monitoringu (AIM), spravovaná ČHMÚ, používá v souladu s ČSN EN 12341 [1] při měření koncentrace frakce částic PM₁₀ vstupní hlavice, kde k požadovanému třídění částic dochází na základě setrvačného (impakčního) odlučovacího principu.

Tříděný odběr vzorků imisí frakce PM₁₀ byl v České republice poprvé zaveden v roce 1995, kde k třídění částic bylo použito hlavice typu KALMAN, skládající se ze dvou částí. První část tvořila vstupní nasávací hlavice, druhou část vlastní třídič – **vírový článek** pracující na odstředivém odlučovacím principu. Jmenovitý objemový průtok odsávaného vzorku imisí byl podle tehdy platných předpisů stanoven na 3 m³/h.

V témže roce 1995 byl publikován zásadní příspěvek z našeho pracoviště [2], uvádějící výsledky ověřovacích měření na laboratorní zkušební trati jak hlavice typu KALMAN, tak podobné hlavice typu VIP (Verewa Instruments Praha), která jako hlavice české provenience měla doplnit ve staniční síti AIM tříděný odběr vzorků imisí tuhých částic, frakce PM₁₀. Výsledky ověřovacích měření [2] ukázaly, že ani hlavice KALMAN, ani VIP netřídí částice s požadovanou hodnotou meze odlučivosti $a_{1,m} = 10$ µm, ale obě hlavice při daném průtoku odsávaného vzorku 3 m³/h a rychlosti proudění vzduchu kolem vstupní nasávací hlavice 5–10 m/s třídí u zcela odlišných hodnot $a_{1,m} = 3,0$ až 4,5 µm.

K urychlenému zavedení imisního monitoringu částic frakce PM₁₀ přístrojů na základě impakčního odlučovacího principu koncem 90. let a začátkem tohoto století přispěly nejenom výsledky našich experimentů s cyklónovými třídiči, ale i implementace normy EN 12341 z roku 1998 do naší legislativy [1]. Tato norma zavedla jako referenční způsob měření

imisí frakce PM₁₀ u nízkoprůtokového, středněprůtokového i vysokoprůtokového systému vzorkovacího zařízení, pracující na základě setrvačného (impakčního) odlučovacího principu. Objemový průtok odsávaného vzorku u nízkoprůtokového systému byl stanoven konstantní, $V = 2,3$ m³/h.

Cílem příspěvku je seznámit veřejnost s vývojem imisního třídiče frakce PM₁₀ pracujícího na odstředivém principu a ukázat, že tento odlučovací princip je spolehlivý a zařízení je nenáročné na obsluhu a splňuje požadavky na tříděný odběr vzorku imisí frakce PM₁₀ pro AIM. V porovnání s impakčním principem, kde třídící vlastnosti vzorkovacího zařízení závisí na povrchové úpravě a kvalitě nárazové plochy a tím na pravidelné kontrole a údržbě, se odstředivý odlučovací princip jeví díky svým vlastnostem jako výhodnější a praktičtější.

DEFINICE FRAKCE PM₁₀ A POŽADAVKY NA TŘÍDICÍ SCHOPNOSTI ODBĚROVÉHO ZAŘÍZENÍ

Frakce částic PM₁₀ byla přesně definována v dnes již zrušené evropské normě [1], kde se uvádí, že PM₁₀ je cílové označení pro vzorkování „thorakálních“ částic, a blíže se norma odkazuje na normativní Přílohu A. Zde je kromě původní definice frakce PM₁₀ dle US Federal Register [3] uvedena i zmíněná definice „vzorkovací konvence thorakální frakce“ dle ISO 7708, resp. ČSN ISO 7708 [4]. Podle této konvence odpovídají při odběru vzorku imisí třídičem jeho třídící schopnosti třídícím schopnostem člověka při vdechování aerodisperzní směsi nosem a průchodu částic hrtanem a jsou z hlediska třídění definovány hodnotami frakčního průniku P_f v závislosti na **aerodynamické velikosti částice a_p (µm)**. Protože u každého třídícího systému pro každou velikost částice mezi frakčním průnikem P_f a frakční odlučivostí O_f obecně platí $P_f = 1 - O_f$, lze z uvedené závislosti $P_f = f(a_p)$ odvodit i požadovanou závislost $O_f = f(a_p)$. Závislost

$P_f = f(a_f)$, resp. $O_f = f(a_f)$ je charakteristická tím, že pro částici o velikosti $a_f = 10 \mu\text{m}$ je $P_f = O_f = 50 \%$.

Jednoduchá definice frakce částic PM_{10} je uvedena v zákoně o ochraně ovzduší [3], kde se v § 7, čl. 3 uvádí, že frakce PM_{10} se u emisí tuhých částic získá při průchodu vzorku částic velikostně-selektivním filtrem, který pro částici aerodynamické velikosti $10 \mu\text{m}$ vykazuje odlučovací účinnost 50 %. V porovnání s předcházející definicí dle [1] zde není uveden celý průběh třídění a není tedy uveden ani požadavek na ostrost třídění.

Podobná definice frakce PM_{10} byla uvedena i u předcházející právní úpravy v ochraně ovzduší, kde u právního předpisu z oblasti imisí a kvality ovzduší [6] bylo v § 3, čl. 2 uvedeno, že částice PM_{10} jsou částice, které projdou velikostně-selektivním vstupním filtrem vykazujícím pro aerodynamickou velikost $10 \mu\text{m}$ odlučovací účinnost 50 %.

U definice frakce PM_{10} , která vychází z [1] a [4], je průběh závislosti $O_f(a_f)$ téměř symetrický, tj. ve tvaru „S-křivky“. Jak již bylo uvedeno, u definice PM_{10} dle předcházející i stávající legislativy v ochraně ovzduší [3] a [6] se u velikostně-selektivního filtru (tříděče) ostrost třídění neuvádí, pouze se u částice $a_f = 10 \mu\text{m}$ požaduje hodnota frakční odlučivosti 50 %.

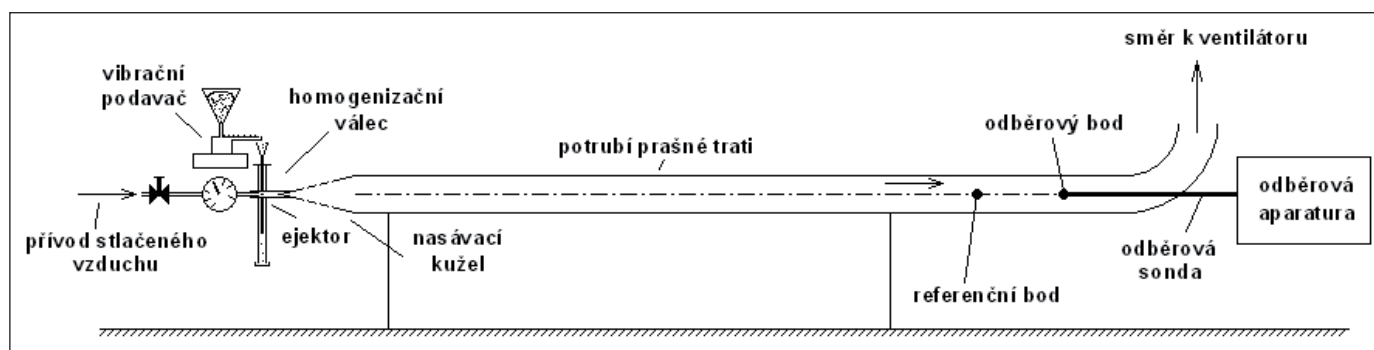
Z uvedeného výčtu různých definic frakce PM_{10} pro nás u vývoje odběrového zařízení pro měření imisí frakce PM_{10} vyplývá požadavek, aby při jmenovitém objemovém průtoku $2,3 \text{ m}^3/\text{h}$, odpovídajícím průtoku u nízkopřtokového odběrového zařízení, bylo dosaženo přibližně symetrické závislosti $O_f(a_f)$, tj. závislosti ve tvaru „S-křivky“, a kde u velikosti částice $a_f = 10 \mu\text{m}$ se dosahuje hodnoty frakční odlučivosti $O_f = 50 \%$.

U dvoustupňového odběrového zařízení, které se skládá z nasávací hlavičky a cyklónového tříděče, předpokládáme, že nasávací hlavička je jednoduchá hlavička s minimálními třídícími schopnostmi v oblasti velikosti částic do cca $40 \mu\text{m}$, která slouží pouze jako ochrana proti vstupu hmyzu a listů a musí také zajistit ochranu proti dešti, obdobně jako je tomu na vstupu do referenčního zařízení LVS-PM10 dle ČSN EN 12341. Výsledné třídící schopnosti celého odběrového zařízení v oblasti velikosti částic frakce PM_{10} jsou pak dány třídícími schopnostmi koncového stupně, tedy vírového článku. Požadavky na třídící schopnosti imisního tříděče frakce PM_{10} proto považujeme za požadavky na třídící schopnosti vírového článku a vlastní vývoj imisního tříděče se tak zjednodušuje na vývoj samotného vírového článku.

EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ A METODA STANOVENÍ TŘÍDICÍCH SCHOPNOSTÍ VÍROVÝCH ČLÁNKŮ

Experimentální trať

Experimenty byly uskutečněny na vodorovné prašné zkušební trati o vnitřním průměru 97 mm, délky 4 m. Schéma tratě je uvedeno na obr. 1.



Obr. 1 Schéma prašné zkušební tratě

Fig. 1 Diagram of the test track

Podávací zařízení na vstupu do zkušební trati se skládá z vibračního korytkového podavače Fritsch, odkud prach vstupuje přes homogenační válec do směšovacího ejektoru. Difuzor ejektoru je zaústěn do osy vstupního kuželového směšovacího kusu, kde se koncentrovaná prachová směs intenzivně směšuje se vzduchem přísávaným z laboratoře do vlastní zkušební trati. Směšovací ejektor pracuje při provozním přetlaku stlačeného vzduchu $0,4 \text{ MPa}$. Na konci horizontálního úseku trati je zařazen oblouk 90° , za kterým navazuje $1,5 \text{ m}$ vertikální úsek, napojený přes další oblouk na hadicový filtr. Výstup vzduchu z filtru je kruhovým potrubím napojen na radiální vysokotlaký ventilátor vybavený frekvenčním měničem otáček.

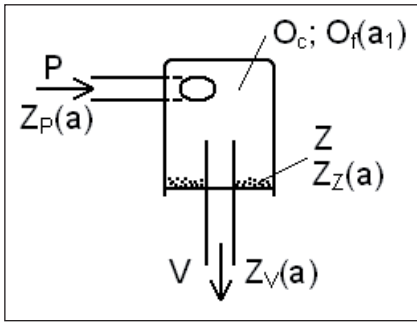
Jako zkušební prach se používají různé vyříděné elektrárenské popílky s hmotnostním mediánem $a_{med,M}$ v rozsahu $7,7$ až $12 \mu\text{m}$, interně označené jako B2, E1, E4 a F3. Koncentrace prachu se v závislosti na podávacím výkonu a průtoku vzduchu trati pohybuje v rozmezí $1\text{--}2 \text{ g}/\text{m}^3$.

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 $O_f(a_f)$ na základě granulometrických analýz příslušných vzorků částic u cyklónu – bližší viz následující kapitola.

Pro účely odběru vzorku aerodisperzní směsi z osy kanálu je testovaný cyklón vybaven přímou odběrovou sondou délky 400 mm o vnitřním průměru $9,5 \text{ mm}$, která je na konci na vstupní trubku do cyklónu napojena přes kónický přechodový kus. Na druhý konec sondy je napojena odběrová hlavička s průměrem ústí $10,2 \text{ mm}$. Odběrová sonda s hlavicí je prostrčena koncovým obloukem horizontální prašné trati a ústí odběrové sondy se nachází v ose kanálu v dostatečné vzdálenosti před obloukem, kde ještě není narušeno rychlostní a koncentrační pole.

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

Vlastní odběrová trať se skládá z odběrové sondy s hlavicí, testovaného cyklónu napojeného na výstupu krátkým spojovacím kusem na koncový filtr, který je vybavený filtračním papírem ze skelných vláken. Na výstup z filtru je ohebnou hadicí napojena cejchovaná měřicí clonková trať pro malá Reynoldsova čísla o vnitřním průměru tratě 26 mm , vybavená čtvrtkruhovou dýzou o jmenovitém průměru 9 mm . Na výstupu je clonková trať napojena přes přísávací ventil a ukliďující nádobu na lamelovou vývěvu Becker.



Obr. 2 Schéma cyklónu jako třídíče tuhých částic
Fig. 2 Diagram of the cyclone as a solid particles separator

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

Při použití odběrové sondy s hlavicí Ø10,2 mm odpovídá při předpokládaném průtoku cyklónem 2,3 m³/h rychlost v ose kanálu a v ústí sondy (izokinetické odsávání) cca 7,8 m/s.

Metoda stanovení frakční odlučivosti

Na obr. 2 je uvedeno schéma cyklónu jako třídíče tuhých částic. Označme P přívod do cyklónu, Z záchyt a V výstup z cyklónu. Částice vstupující do cyklónu se v cyklónu buď odlučí a dostanou se do záchytu, nebo cyklónem proniknou a dostanou se do výstupu. Mezi přívodem, záchytem a výstupem platí jednoduché bilanční vztahy.

Pro celkové hmotnostní toky částic platí vztah:

$$\dot{M}_p = \dot{M}_v + \dot{M}_z \tag{1}$$

Vyjádříme-li u cyklónu odpovídající zrnitosti částic křivkami zbytků Z_z(a), Z_v(a) a Z_p(a), znázorněné na obr. 3, potom pro frakční hmotnostní toky částic v intervalu velikostí (a, a+da) platí bilanční vztah:

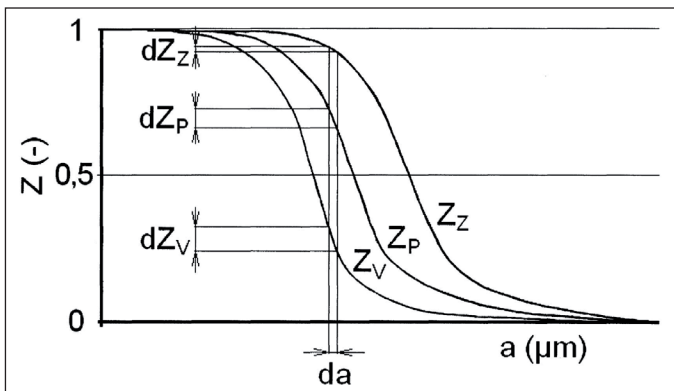
$$\dot{M}_p dZ_p(a) = \dot{M}_v dZ_v(a) + \dot{M}_z dZ_z(a) \tag{2}$$

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

$$O_c = \frac{\dot{M}_z}{\dot{M}_p} \tag{3}$$

Frakční odlučivost O_f částic v intervalu velikostí (a, a+da) se stanoví jako poměr frakčních hmotnostních toků v záchytu a přívodu, tedy:

$$O_f = \frac{\dot{M}_z dZ_z}{\dot{M}_p dZ_p} = O_c \frac{dZ_z}{dZ_p} \tag{4}$$



Obr. 3 Křivky zbytků částic v přívodu, záchytu a výstupu
Fig. 3 Retained fractions curve for the intake, capture and outlet

Analogicky, frakční průnik P_f částic v intervalu velikostí (a, a+da) se stanoví jako poměr frakčních hmotnostních toků ve výstupu a přívodu, tedy:

$$P_f = 1 - O_f = \frac{\dot{M}_v dZ_v}{\dot{M}_p dZ_p} = (1 - O_c) \frac{dZ_v}{dZ_p} \tag{5}$$

Vyjádříme-li z obou vztahů (4) a (5) dZ_p, obdržíme bilanční vztah mezi záchytem a výstupem:

$$\frac{O_f}{1 - O_f} dZ_v = \frac{O_c}{1 - O_c} dZ_z \tag{6}$$

Úpravou vztahu (6) získáme vyjádření frakční odlučivosti O_f ve tvaru:

$$O_f = \frac{\frac{O_c}{1 - O_c} dZ_z}{dZ_v + \frac{O_c}{1 - O_c} dZ_z} = \frac{\frac{O_c}{1 - O_c} \Delta Z_z}{\Delta Z_v + \frac{O_c}{1 - O_c} \Delta Z_z} \tag{7}$$

kde je u druhého zlomku již provedena náhrada diferenciálního vztahu vztahem diferenčním a kde hodnoty diferencí u příslušných křivek zbytků ΔZ_z a ΔZ_v odpovídají zvolenému velikostnímu intervalu Δa.

Metoda, u které je ke stanovení závislosti O_f(a) požadována znalost celkové odlučivosti O_c a křivek zbytků vzorků prachu v záchytu Z_z(a) a výstupu Z_v(a), se nazývá metoda záchyt – výstup. Výhodou této metody je skutečnost, že u větších částic, kde se dle obr. 3 hodnota ΔZ_v blíží k nule, se hodnota frakční odlučivosti O_f dle vztahu (7) blíží k jedné, tedy k hodnotě, která se u odstředivého odlučovacího principu teoreticky očekává.

U prováděných experimentů je doba měření přizpůsobena požadavku zajištění dostatečných hmotností prachu v cyklónu (v záchytu) i hmotností 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 zatřídí 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.

Vlastní stanovení závislosti frakční odlučivosti O_f na aerodynamické velikosti částice a₁ (μm) je možno provést dvojím způsobem. U prvního způsobu pracujeme se skutečnou velikostí částice a (μm) a teprve na závěr výslednou závislost O_f(a) přepočteme na závislost O_f(a₁) dle vztahu:

$$a_1 = a \sqrt{\frac{\rho_c}{1000}} \tag{8}$$

kde ρ_c (kg/m³) značí hustotu materiálu částic, zde ρ_c ≈ 2200 kg/m³.

U druhého způsobu přepočteme hned na začátku zjištěné křivky zbytků Z_z(a) a Z_v(a) na závislosti Z_z(a₁) a Z_v(a₁) a zpracování výsledů probíhá od začátku s aerodynamickými velikostmi částice a₁.

Korekce zjištěné závislosti O_f(a₁)

Vlivem nedokonalého rozbití shluků částic zkušební prachu při vlastním experimentu a naopak dokonalém rozbití shluků pomocí ultrazvuku u přípravy vzorků částic pro analýzy zrnitosti částic na laserovém analyzátoru dochází při vyjádření závislosti O_f(a) nebo O_f(a₁) k systematické chybě v oblasti jemných částic, kde jednotlivé hodnoty O_f(a) nebo O_f(a₁)

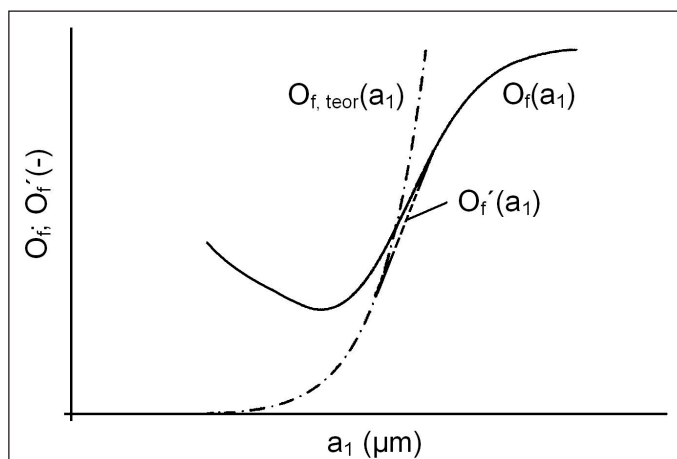

 Obr. 4 Korekce křivky $O_f(a_1)$

 Fig. 4 Correction of the curve $O_f(a_1)$

nabývají nenulových hodnot. V oblasti jemných částic je nutno zjištěné závislosti $O_f(a)$ nebo $O_f(a_1)$ korigovat na teoreticky předpokládané hodnoty. U odstředivého odlučovacího principu, ale i u impakčního (setrvačného) principu pro jemné částice teoreticky platí, že $O_f \rightarrow 0$. Možné způsoby korekce výsledků a jejich oprávnění použití byly podrobně analyzovány v dizertační práci [8].

Reálný průběh závislosti $O_f(a_1)$ při zpracování výsledků měření metodou záchyt – výstup je uveden na obr. 4, kde je současně znázorněn i korigovaný průběh závislosti $O_f'(a_1)$.

Korekce vychází z předpokladu, že v oblasti jemných částic, kde se zjištěné hodnoty O_f zvyšují se zmenšující se velikostí částice, je průběh $O_f(a_1)$ nereálný a zatížený výše uvedenou systematickou chybou. Korigovaná závislost $O_f'(a_1)$ v souladu s teoretickou závislostí $O_{f, \text{teor}}(a_1)$ vychází z hodnoty 0 a má parabolický tvar [8]. V oblasti středních hodnot O_f korigovaná křivka $O_f'(a_1)$ plynule navazuje na experimentálně zjištěnou závislost $O_f(a_1)$. Tuto korekci, která výrazně mění zjištěný průběh závislosti $O_f(a_1)$ pouze v oblasti jemných částic a výsledný korigovaný průběh závislosti $O_f'(a_1)$ má předpokládaný tvar „S-křivky“, nazýváme jako „těsná korekce“.

Výsledkem zpracování výsledků experimentů je stanovení korigované závislosti $O_f'(a_1)$ ve tvaru „S-křivky“ a stanovení hodnoty meze odlučivosti $a_{1,m}$ (μm) jako velikosti částice, kde $O_f' = 0,5$.

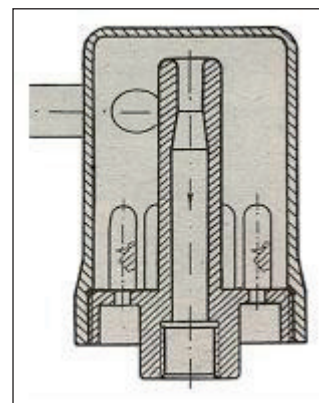
Metoda stanovení hodnoty přibližné meze odlučivosti

Jako přibližnou metodu stanovení třídících (odlučovacích) schopností tříděče (odlučovače) lze použít jednoduchou metodu stanovení hodnoty přibližné meze odlučivosti a_{pmo} resp. $a_{1,pmo}$ (μm), kde hodnota a_{pmo} resp. $a_{1,pmo}$ (μm) odpovídá velikosti částice pro hodnotu hmotnostního zbytku u prachu vstupujícího do tříděče (odlučovače) $Z_p = O_c$. Hodnoty přibližné meze odlučivosti tak odpovídají ideálnímu tříděči, kde právě na této velikosti částice dochází ke skokové změně frakční odlučivosti z hodnoty 0 na 1. U tříděčů (odlučovačů), kde skutečný průběh závislosti $O_f(a)$, resp. $O_f(a_1)$ odpovídá S-křivce jdoucí z hodnoty 0 do 1, platí $a_{pmo} \approx a_m$ resp. $a_{1,pmo} \approx a_{1,m}$.

Tuto metodu lze obecně použít v případech, kde s ohledem na použití odlučovací principy se frakční odlučivost zařízení mění z hodnoty 0 na 1. Tuto podmínku tříděč pracující na odstředivém principu jednoznačně splňuje. Výhodou této metody je snadné a rychlé stanovení odlučovacích schopností tříděče bez nutnosti provedení granulometrických analýz vzorků prachu.



a)



b)

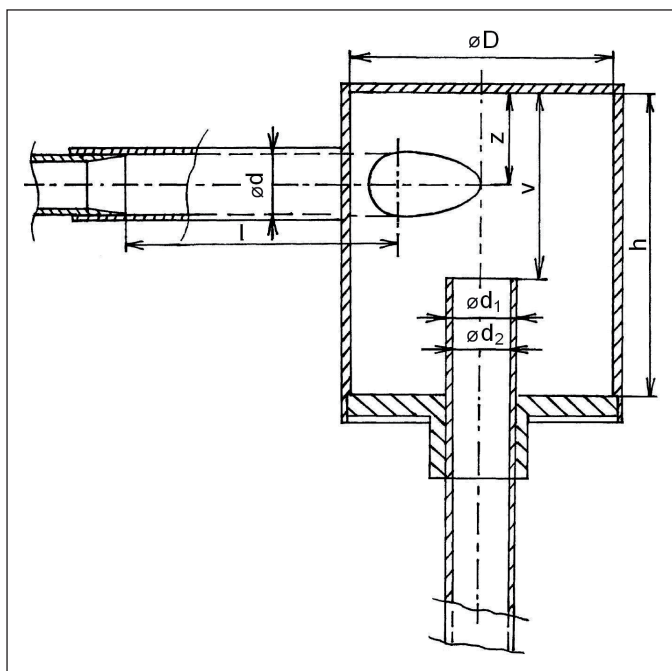
Obr. 5 a) Pohled na vírový článek VIP [2]; b) Vnitřní řez vírovým článkem VIP [2]

Obr. 5 a) Side-view of the vortex element VIP [2]; b) Section of the vortex element VIP [2]

Uvedená metoda má i své nedostatky. Používáme-li při stanovení a_{pmo} resp. $a_{1,pmo}$ přímo podávaný prach, pak je nutno předpokládat, že zrnitost podávaného prachu je shodná se zrnitostí rozptýleného prachu na vstupu (přívodu) do zařízení. Jak vyplývá z výše uvedeného zdůvodnění korekce závislosti $O_f(a_1)$, tento předpoklad však již není přesně splněn. Výsledkem použití této metody pro naše experimentální podmínky je stanovení parametrů třídění, pro které platí $a_{pmo} \neq a_m$ resp. $a_{1,pmo} \neq a_{1,m}$. Metodu lze proto použít pouze jako rychlé orientační zkoušky třídících schopností odběrových zařízení.

VÝVOJ IMISNÍHO TŘÍDĚČE FRAKCE PM_{10}

Vývoj vírového článku PM_{10} vycházel z článku VIP [2], kde vnitřní průměr válce (cyklónu) je $D = 43 \text{ mm}$. Pohled a vnitřní řez článkem je zřejmý z obr. 5a a obr. 5b. Jak již bylo výše uvedeno, tento typ článku byl v 90. letech navržen firmou VIP jako náhrada do té doby používaných hlavíc typu KALMAN. V porovnání s původním návrhem článku (řez vpravo) bylo možno u skutečného provedení (obr. vlevo) měnit vy-



Obr. 6. Charakteristické rozměry vírového článku

Fig. 6. Characteristic dimensions of the vortex element

Tab. 1 Přehled základních geometrických parametrů zkoušených třídičů

Tab. 1 Overview of the basic geometric parameters of the tested separators

Označení	D (mm)	h (mm)	h/D (1)	d (mm)	l (mm)	l/d (mm)	z (mm)	z/D (1)	d_1 (mm)	d_2 (mm)
D64/Ø12	64	88	1,375	12	52	4,33	25	0,391	20,8	15
D64/Ø14	64	88	4,375	14	26,5	1,89	25	0,391	20,8	15
D73/Ø14	73	70	0,959	14	68	4,86	23,7	0,362	20	17
D84/Ø14	84	77	0,917	14	66	4,71	26,4	0,314	20	17
D73/Ø18	73	70	0,959	18	21,5	1,194	28,7	0,393	20	17
D73/Ø17,8	73	70	0,959	17,8	85	4,78	28,7	0,393	20	17

sunutí výstupní trubice od vnitřní horní stěny a ve dně článku, kde se shromažďuje odloučený prach, byly odstraněny vnitřní kolíky.

Charakteristické rozměry vírového článku VIP s tangenciálním vstupem a vysunovatelnou výstupní trubicí jsou uvedeny ve schématu na obr. 6. Válcová odlučovací komora má vnitřní průměr D (mm) a výšku h (mm), tangenciální vstup je realizován kruhovou trubicí s vnitřním průměrem d (mm) a délkou l (mm). Zaústění vstupní trubky je ve vzdálenosti z (mm) od vnitřní horní stěny válcové komory. Výstupní trubka s vnějším a vnitřním průměrem d_1 (mm) a d_2 (mm) je vysunovatelná a vzdálenost mezi ústím trubky a vnitřní horní stěnou válcové komory je v (mm).

Základními rozměry vírového článku jsou vnitřní průměr článku D (mm) a vnitřní průměr vstupní kruhové trubky d (mm), které nejvíce ovlivňují odstředivou sílu jako rozhodující sílu působící na částice prachu při průchodu článkem. Jako základní označení typu vírového článku se proto stalo označení **Dxy/Øvz**, kde xy značí hodnotu průměru článku D v (mm) a vz průměr d v (mm).

Jednotlivé konstrukční změny článku během vývoje byly stanoveny na základě dosažených výsledků měření a aplikace základního kritériálního vztahu:

$$Stk_m = \frac{a_{t,m}^2 \cdot 1000 \cdot v_D}{18 \eta \cdot D} = \frac{a_{t,m}^2 \cdot 1000 \cdot 4V}{18 \eta \cdot \pi D^3} \quad (9)$$

kde v_D (m/s) je fiktivní rychlost vzduchu vztážená na vnitřní průřez válcové komory cyklónu.

U geometricky podobných cyklónů lze předpokládat, že platí $Stk_m \approx \text{konst.}$

Kromě průměru D a průtoku V třídící schopnosti ovlivňuje i velikost vstupního průřezu a následně rychlost vzduchu na vstupu do cyklónu, která při šroubovitém průtoku vzduchu cyklónem zůstává přibližně stejná a jako tangenciální složka rychlosti ovlivňuje odstředivou sílu a tím i konečnou odlučovací rychlost částice v blízkosti válcové stěny u_p (m/s) dle vztahu:

$$u_p = \frac{a_t^2 \cdot 1000 \cdot v_t^2}{18 \eta \cdot D} \quad (10)$$

Ve vztazích (9) a (10) značí η (Pa.s) dynamickou viskozitu plynu (vzduchu) a v_t (m/s) tečnou složku rychlosti vzduchu v blízkosti válcové stěny.

Ze vztahu (9) vyplývá, že zvětšování hodnoty průměru válcové komory D (m) při $Stk_m \approx \text{konst.}$ vede k posunu třídící křivky $O_f(a_p)$ do oblasti větších částic.

Zvětšování vnitřního průměru vstupní trubky d (m) vede při konstantním objemovém průtoku ke snížení rychlosti vzduchu na vstupu do cyklónu a tím ke snížení hodnoty tečné složky rychlosti v blízkosti stěny cyklónu v_t (m/s). Ze vztahu (10) pak vyplývá, že tato změna má za následek snížení hodnoty radiální složky rychlosti částice u_p (m/s) a posunu třídící křivky $O_f(a_p)$ do oblasti větších částic.

Odlučovací schopnosti lze ovlivnit i hodnotou vysunutí výstupní trubky – vzdáleností mezi ústím trubky a vnitřní horní stěnou válcové komory v (mm). Zpravidla platí, že s počátečním zvyšováním hodnoty v (mm) se odlučovací schopnosti nejprve zlepšují (zvyšování hodnoty celkové odlučivosti O_c a posun závislosti $O_f(a_p)$ do oblasti menších částic), až se dosáhne plochého maxima a při dalším zvyšování hodnoty v (mm) se odlučovací schopnosti opět zhoršují.

Během vývoje byl zjištěn významný vliv uspořádání vstupu na výsledné chování třídiče. K předpokládaným změnám dle výkladu vztahu (10) dochází v případech, kde délka vstupní trubky je dostatečně dlouhá, cca $l = 5d$ a rychlost vzduchu a částic na vstupu do cyklónu zhruba odpovídají střední rychlosti vyvinutého proudu vzduchu na výstupu z trubky. U uspořádání vstupu s krátkou vstupní trubicí cca $l = d$ a relativně krátkým kónickým přechodem mezi odběrovou sondou a vstupní trubicí byly zjištěny odlučovací schopnosti, které odpovídají uspořádání vstupu s dostatečně dlouhou vstupní trubicí s menším vnitřním průměrem. Toto zjištění, které může být zdrojem závažných chyb při experimentování a použití přístrojů pro měření imisí a zejména emisí, kde rozhodující veličinou je vstupní rychlost částice do přístroje, je předmětem příspěvku [12].

Přehled základních konstrukčních parametrů zkoušených třídičů

V tab. 1 a tab. 2 je uveden přehled základních geometrických parametrů zkoušených třídičů a rozsah hodnot vysunutí výstupní trubky v (mm), ve kterém byly jednotlivé třídiče testovány. Zároveň je uvedeno, zda byly uskutečněny zkoušky se stanovením třídících křivek $O_f(a_p)$ a korekce $O_c(a_p)$, nebo byly uskutečněny pouze orientační zkoušky se stanovením hodnoty přibližné meze odlučivosti $a_{t,pmo}$ (μm).

Druhý vírový článek D64/Ø14 byl s odběrovou sondou spojen kónickým přechodem a krátkou vstupní trubicí $l/d = 1,89$ [9], rovněž tak v tabulce předposlední vírový článek D73/Ø18 byl s odběrovou sondou spojen kónickým přechodem a krátkou vstupní trubicí $l/d = 1,194$ [11]. U ostatních zkoušených typů byla vstupní trubka dostatečně dlouhá a poměr l/d dosahoval hodnot v rozsahu 4,33 až 4,86. Všechna měření byla uskutečněna při objemovém průtoku odsávaného vzorku $V = 2,3 \text{ m}^3/\text{h}$.

Vývoj vírového článku PM_{10} dospěl k rozměrům hlavice D73/Ø17,8 s dlouhou vstupní trubicí $l/d \approx 5$ [11].

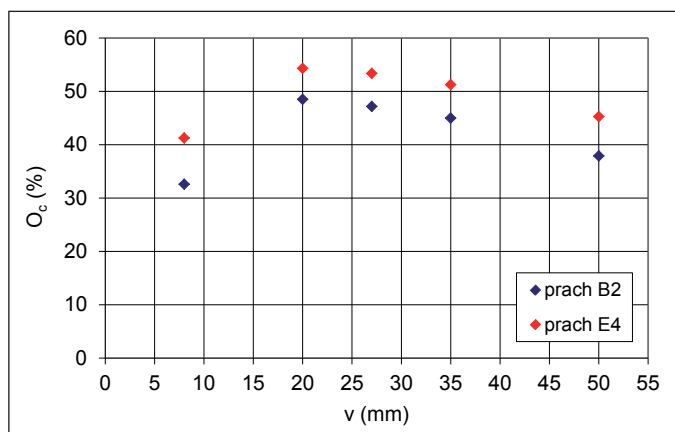
Tab. 2 Rozsah hodnot vysunutí výstupní trubky v (mm) a způsob zpracování výsledků měření

Tab. 2 Range of the extrusion lengths of the outlet pipe v (mm) and the method of the measurement results processing

Označení	v (mm)	stanovení $O_c(a_i)$	stanovení $a_{1,pmo}$	literatura
D64/Ø12	8; 30; 52	ano	-	[7]
D64/Ø14	8; 30; 52	ano	-	[9]
D73/Ø14	8; 12,5; 20; 35; 50	-	ano	[10]
D84/Ø14	10; 14; 28; 46; 64	-	ano	[10]
D73/Ø18	8; 20	-	ano	-
D73/Ø17,8	8; 20; 27; 35; 50	ano	-	[11]

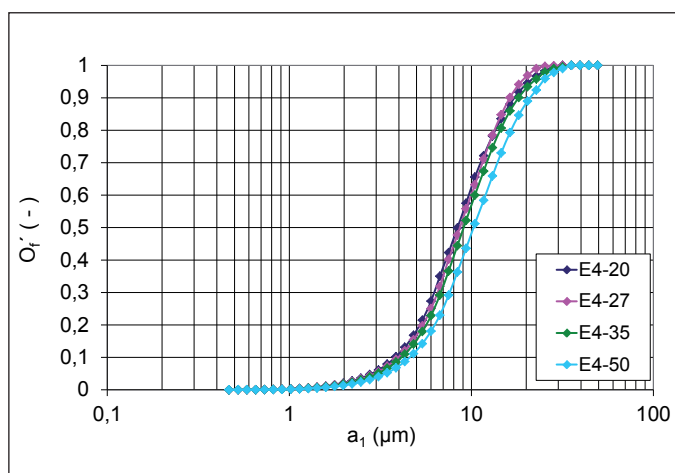
Výsledky měření cyklónového třídiče D73/Ø17,8

S cyklónovým třídičem D73/Ø17,8 byly uskutečněny dvě série měření se zkušebními prachy s označením E4 ($a_{1,med,M} = 12,3 \mu\text{m}$) a B2 ($a_{1,med,M} = 11,4 \mu\text{m}$), kde byly stanoveny závislosti celkové odlučivosti $O_c(1)$ na vysunutí výstupní trubky v (mm) v rozsahu hodnot 8 až 50 mm. Výsledky měření jsou uvedeny na obr. 7.



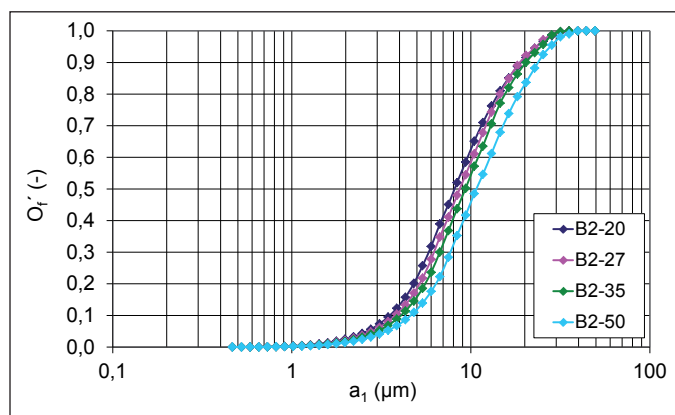
Obr. 7 Výsledky měření závislosti $O_c = f(v)$ se zkušebními prachy E4 a B2

Fig. 7 The results of measurements of the dependency $O_c = f(v)$ with the test dusts E4 and B2



Obr. 8 Korigované závislosti $O_f(a_i)$ v závislosti na vysunutí v (mm) – zkušební prach E4

Fig. 8 Corrected dependencies $O_f(a_i)$ in dependency on the extrusion v (mm) – test dust E4



Obr. 9 Korigované závislosti $O_f(a_i)$ v závislosti na vysunutí v (mm) – zkušební prach B2

Fig. 9 Corrected dependencies $O_f(a_i)$ in dependency on the extrusion v (mm) – test dust B2

Z průběhu závislosti $O_c = f(v)$ je zřejmé, že v oblasti vyšších hodnot vysunutí výstupní trubky v (mm) jsou změny hodnot $O_c(1)$ a tedy i změny třídících schopností méně výrazné a méně závislé na přesném nastavení výstupní trubky. Proto jsme se při dalším zpracování výsledků měření soustředili na oblast $v \geq 20$ mm.

Vzorky prachu v záchytu a výstupu u měření s vysunutím výstupní trubky $v = 20, 27, 35$ a 50 mm byly analyzovány a metodou záchyt – výstup stanoveny odpovídající závislosti $O_c(a_i)$, $O_f(a_i)$. Korigované závislosti $O_f(a_i)$ byly stanoveny s použitím „těsné korekce“.

Korigované závislosti $O_f(a_i)$ pro jednotlivé zkušební prachy a vysunutí v (mm) jsou uvedeny na obr. 8 a obr. 9. Z výsledků je zřejmé, že u cyklónu D73/Ø17,8 bylo dosaženo poměrně ostrého třídění, změny $O_f(a_i)$ s vysunutím v (mm) mají logický charakter a jsou reálné předpoklady splnění podmínek pro tříděný odběr vzorku frakce PM_{10} .

U korigovaných závislostí $O_f(a_i)$ byly pro hodnoty $O_f = 0,5$ stanoveny odpovídající hodnoty mezí odlučivosti $a_{1,m}$ (μm) a tyto hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.

Tab. 3 Zjištěné hodnoty mezí odlučivosti $a_{1,m}$ (μm) u cyklónu D73/Ø17,8

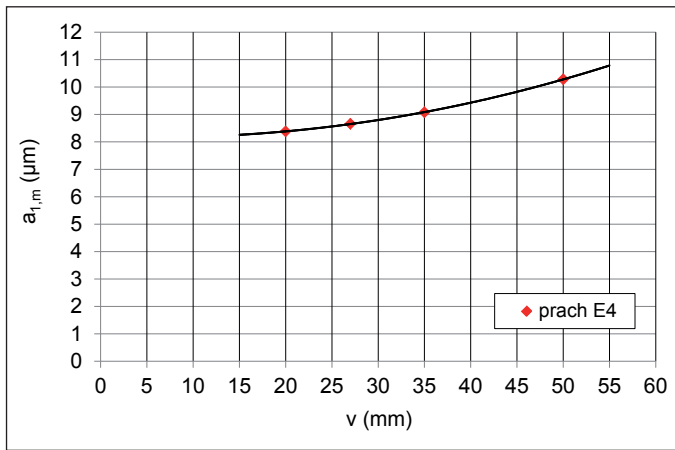
Tab. 3 Determined values of the separability limits $a_{1,m}$ (μm) for the cyclone D73/Ø17,8

v (mm)	20	27	35	50
$a_{1,m}$ (μm) – prach E4	8,38	8,66	9,08	10,28
$a_{1,m}$ (μm) – prach B2	8,12	8,68	9,33	10,76

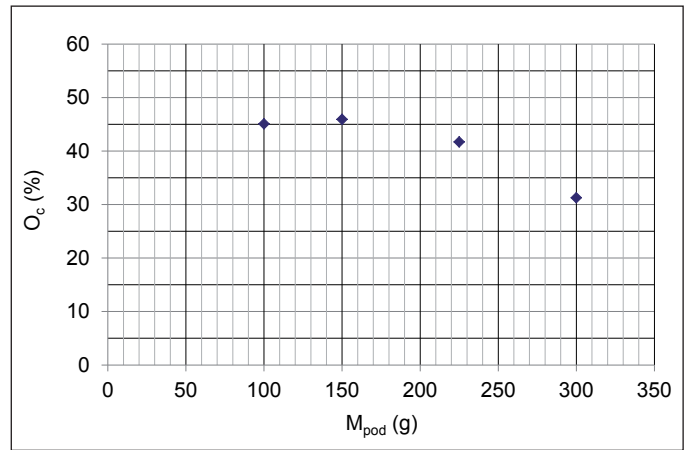
Výsledné závislosti $a_{1,m} = f(v)$ vyjádřené ve formě polynomu 2. stupně pro jednotlivé zkušební prachy jsou vyneseny na obr. 10 a obr. 11.

Z jednotlivých průběhů závislosti $a_{1,m} = f(v)$ vyplývá, že hodnoty $a_{1,m}$ (μm) se s vysunutím výstupní trubky v (mm) mírně posouvají do oblasti hrubších částic a požadované hodnoty $a_{1,m} = 10 \mu\text{m}$ se podle experimentů s prachem E4 dosáhne při vysunutí $v = 46,9$ mm a experimentů s prachem B2 při vysunutí $v = 42,3$ mm.

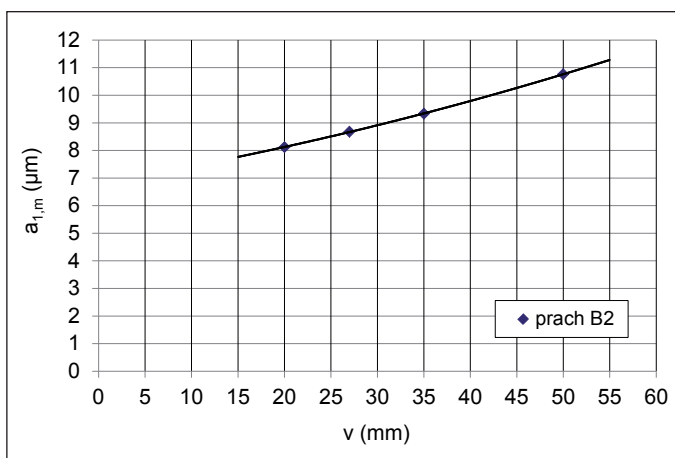
Protože zjištěné třídící schopnosti, tj. závislost $O_f(a_i)$ a odpovídající hodnoty mezí odlučivosti $a_{1,m}$ (μm) by neměly být závislé na použitém zkušebním prachu, je doporučena výsledná hodnota vysunutí v (mm) stanovena jako střední hodnota z výsledků obou sérií měření, tedy $v = 45$ mm.



Obr. 10 Zjištěný průběh závislosti $a_{1,m} = f(v)$ pro zkušební prach E4
Fig. 10 Determined dependency $a_{1,m} = f(v)$ for the test dust E4



Obr. 12 Zjištěná závislost $O_c = f(M_{pod})$
Fig. 12 Determined dependency $O_c = f(M_{pod})$



Obr. 11 Zjištěný průběh závislosti $a_{1,m} = f(v)$ pro zkušební prach B2
Fig. 11 determined dependency $a_{1,m} = f(v)$ for the test dust B2

Odhad doby bezchybného provozu cyklónu jako třídiče PM₁₀ pro atmosférický prach

Závěrečnou fází experimentů bylo stanovení provozní jímavosti cyklónu, tj. stanovení maximální hmotnosti zachyceného prachu, při kterém ještě nedochází k výrazným změnám odlučovacích schopností cyklónu. Pro tyto účely byla uskutečněna série experimentů, kde byla zjištěna závislost změny celkové odlučivosti O_c (1) na celkové hmotnosti podaného prachu, resp. na době podávání zkušebního prachu při konstantní koncentraci prachu ve zkušební trati. Experimenty byly uskutečněny s prachem E4 při vysunutí výstupní trubky $v = 46$ mm a s měnicími se dobami provozu $\tau = 20, 30, 45$ a $58,5$ min, kde bylo podáno celkem $M_{pod} = 100, 150, 225$ a 300 g zkušebního prachu. Zjištěná závislost $O_c = f(M_{pod})$ je uvedena na obr. 12.

Z výsledků experimentů vyplývá, že minimální doba provozu cyklónu při neměnných odlučovacích schopnostech ($O_c \approx 45\%$) je 30 min, kdy bylo podáno celkem 150 g zkušebního prachu. Hmotnost zachyceného prachu u tohoto měření byla $M_z = 0,57$ g a tuto hmotnost prachu můžeme dále považovat za odhad provozní jímavosti cyklónu M_{pj} (g).

Provozní jímavost cyklónu M_{pj} (g) nám umožňuje odhadnout minimální dobu provozu cyklónu jako třídiče PM₁₀ u měření imisí atmosférického prachu bez požadavku údržby $\Delta\tau$ (h). U tohoto odhadu předpokládáme, že celková koncentrace tuhých příměsí (TSP) je na úrovni 24hodinového imisního limitu pro frakci PM₁₀, tedy $C_{TSP} = C_{IL,PM10} = 50$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$, a u gra-

nulometrického složení atmosférického prachu uvažujeme složení jako u městského aerosolu, kde lze předpokládat, že pro částici $a_i = 10$ μm je hodnota hmotnostního propadu $P_M(10 \mu\text{m}) \approx 0,8$, resp. hmotnostního zbytku $Z_M(10 \mu\text{m}) \approx 0,2$.

Pro hmotnost zachyceného prachu v cyklónu M_z (μg), který třídí při $a_{1,m} = 10$ μm , lze pak psát rovnici:

$$M_z = V C_{TSP} Z_M(10) \Delta\tau \quad (11)$$

Při objemovém průtoku $V = 2,3$ m^3/h a pro stanovenou hodnotu provozní jímavosti $M_z = M_{pj} = 0,57 \cdot 10^6$ μg výpočtem vychází $\Delta\tau = 24782$ h, tedy více než 1000 dnů provozu bez potřeby údržby.

ZÁVĚR

Experimenty na prašné zkušební trati a postupnými úpravami byly stanoveny hlavní geometrické parametry cyklónového třídiče (vírového článku) typu D73/ \varnothing 17,8, který při objemovém průtoku $V = 2,3$ m^3/h třídí podle požadavků frakce tuhých částic PM₁₀. Schéma třídiče je uvedeno na obr. 6 a jeho hlavní rozměry jsou uvedeny v posledním řádku tab. 1. Z hlediska uspořádání vstupní trubky je třeba její dostatečná délka $l/d \approx \text{min. } 5$. Vysunutí výstupní trubky bylo stanoveno na hodnotu $v = 45$ mm.

Významnou vlastností tohoto třídiče pracujícího na odstředivém odlučovacím principu je spolehlivost a vysoká hodnota provozní jímavosti, která umožňuje dlouhodobý provoz třídiče bez nebezpečí změny odlučovacích schopností s časem. V porovnání s třídiči, které pracují na setrvačném (impakčním) odlučovacím principu a kde odlučovací schopnosti silně závisí na druhu, kvalitě povrchové úpravy a expozici impakční plochy, je cyklónový článek jednoduchý a zejména spolehlivý třídič, který by podle názoru autorů měl znovu nalézt své místo jako koncový prvek u systémů měření imisí frakce PM₁₀.

Kontakt na autora: Jiri.Hemerka@fs.cvut.cz

Použité zdroje:

- [1] ČSN EN 12341 (835612) Kvalita ovzduší – Stanovení frakce PM₁₀ aerosolových částic – Referenční metoda a postup při terénní zkoušce ověření požadované těsnosti shody mezi výsledky hodnocené a referenční metody.
- [2] HEMERKA J., MERTA, M. Experimentální ověření hlavice PM10. *Ochrana ovzduší*. 1995, č. 6.
- [3] US Federal Register 40 CFR Part 53, July 1987.

- [4] ČSN ISO 7708 Kvalita ovzduší – Definice velikostních frakcí částic pro odběry vzorků k hodnocení zdravotních rizik.
- [5] Zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší.
- [6] Nařízení vlády č. 597/2006 Sb. o sledování a vyhodnocování kvality ovzduší.
- [7] PODUŠKA, V. Tříděný odběr vzorků imisí. Diplomová práce. Fakulta strojní ČVUT v Praze, 2009.
- [8] BRANIŠ, M. Tříděný odběr vzorků emisí. Praha, 2009. Disertační práce. Fakulta strojní ČVUT v Praze.
- [9] NOVOTNÁ, Š. Návrh a experimentální ověření imisní hlavice PM₁₀. Praha, 2009. Diplomová práce, Fakulta strojní ČVUT v Praze.
- [10] PETRÁK, V. Imisní monitoring tuhých znečišťujících látek. Praha, 2009. Bakalářská práce. Fakulta strojní ČVUT v Praze.
- [11] ŠVANDOVÁ, K. Návrh a experimentální ověření imisní hlavice PM₁₀. Praha, 2009. Bakalářská práce. Fakulta strojní ČVUT v Praze.
- [12] HEMERKA, J., VYBÍRAL, P. Vliv uspořádání vstupní trubky na třídící schopnosti vírového článku – třídíče frakce PM₁₀. Sborník XVI. výroční konference České aerosolové společnosti. Česká aerosolová společnost, 2015. ■

Thajsko do 10 let centrem střešní solární energie jihovýchodní Asie

Podle thajské národní rady pro reformy (NRC) se Thajsko stane do 10 let regionální velmocí jihovýchodní Asie ve střešních solárních energetických zařízeních a elektromobilech. Návrh reformy byl již schválen thajskou vládou. Přestože Thajsko má dostatečné zásoby zemního plynu, obává se, že při současném vývoji spotřeby energie budou vyčerpány do 10 let a země nebude mít připraveny náhradní zdroje energie. Do 5 let má být proto instalováno střešní solární zařízení jako zdroj energie nejméně pro 100 000 domácností včetně potřeby pro klimatizace. S tím má počítat i výstavba nových domů.

Byla schválena i podpora širokého využívání elektromobilů včetně výroby vozů a baterií v Thajsku. Thajská vláda finančně podpoří jejich výrobu v 17 soukromých závodech. Jde o zajímavý postup, jehož cílem je energetická budoucnost země, využívání obnovitelných zdrojů a snížení závislosti na dovozu fosilních zdrojů.

Pramen: Newsletter veletrhu Cartec 2015, Mnichov, říjen 2015 (AB)

Návrhy klimatizací jsou nevýhodné pro ženy

Pravidla, podle nichž se navrhuje klimatizace v kancelářských budovách, jsou nevýhodná pro ženy, jež mají pomalejší metabolismus, a jsou proto zimomřivější než muži. Projektanti vycházejí z norem používaných od šedesátých let minulého století. Návrhy vytápění a klimatizace kalkulují s mužským organismem a výsledkem je, že ženy v kancelářských budovách často pociťují chladno. Tvrdí to nizozemští vědci Boris Kingma a Wouter van Marken Lichtenbelt z Maastrichtské univerzity.

Ženy mají proti mužům pomalejší metabolismus, což znamená, že jejich tělo za jednotku času spotřebuje méně energie než mužské. Jelikož se velká část energie, která projde lidským tělem, mění na teplo, ženy se také méně zahřejí. Mohou si samozřejmě změnit klimatizaci na vyhovující teplotu. Když jsou však plány budovy propočítané podle norem pro mužské pracovníky tak, aby byl její provoz co nejúspornější, odlišné nastavení se může prodařit.

Kingma a van Marken Lichtenbelt měřili energetické výdaje dobrovolnic, které seděly na židli za stolem u počítače v laboratoři s nastavitelnou teplotou. V časopise Nature Climate Change vědci tvrdí, že ženy vytvoří při lehké kancelářské práci asi o 20 až 30 % méně tepla než muži.

Pramen: Nature Climate Change, 20. 5. 2015, a Týden, 10. 8. 2015 (AB)

VĚTRÁNÍ (VELKO)KUCHYNÍ

VĚTRACÍ STROP TPV Exclusive

- Exkluzivní design
- Maximální prosvětlenost celého prostoru
- Ochrana stavebních konstrukcí
- Vysoká účinnost filtrace
- Vestavěné LED osvětlení
- Ideální použití pro show kitchen
- Nízké pořizovací a provozní náklady

Atrea®

VĚTRÁNÍ A KLIMATIZACE
(velko) KUCHYNĚ

VĚTRACÍ JEDNOTKY
obč. a průmyslové STAVBY

SYSTÉMY VĚTRÁNÍ
(+ bazény) RD A BYTY

tepelná ČERPADLA
a ZÁSOBNÍKY tepla