

Doc. Ing. Jiří HEMERKA, CSc.,
Ing. Pavel VYBÍRAL,
Karel KOVÁŘÍK
Fakulta strojní ČVUT v Praze,
Ústav techniky prostředí

Objem průmyslového filtru a funkce pulzní regenerace

Size of industrial filter volume and pulse-jet cleaning function

Recenzent
Ing. Jiří Hejma, CSc.

Autor se v příspěvku zabývá vlivem velikosti volného objemu na výstupní straně filtrační hadice, odkud je při pulzní tlakového vzduchu přisáván okolní vzduch do filtrační hadice. Rovněž je poukázáno na vliv volného objemu na vstupní straně filtrační hadice. Prokázalo se, že zvětšení obou těchto objemů vede ke zlepšení funkce regenerace filtrační textilie. Pro hodnocení používá systém bodové klasifikace, zohledňující šest významných hledisek. Navazuje na své předchozí práce, zahrnující velké soubory měření průběhu tlakových změn a zrychlení pohybu filtrační textilie.

Klíčová slova: filtrace, regenerace, pulzní profuk, filtrační hadice

Authors deals with the analysis of the influence of free volume rate on the outside (induced air problem) and also on the inside part (free space for the expansion of the air) of filter hose. It was confirmed that the larger these volumes are the better is the function of the hose regeneration. For the evaluation of the process uses authors the method of point calculation of various measured states, the method created by self. Respected are 6 points of view and 4 volume combinations. This contribution continues many files of measurements of pressure time changes and hose acceleration made by authors in recent years.

Key words: filtration, regeneration, pulse-jet, filtration hose

Filtrace patří k neúčinnějším způsobům odstraňování tuhých příměsí z proudu plynu. Nejrozšířenější a neúčinnější způsob regenerace filtračních materiálů u průmyslové filtrace je regenerace pulzním profukem. Hadicové filtry s pulzní regenerací se u nás začaly více používat až v 90. letech minulého století a u některých technologií vytvořily alternativu k tradičním kapsovým filtrům s regenerací zpětným proplachem a u některých technologií, jako např. u kotlů na pevná paliva, nahradily do té doby používané mechanické odlučovače, které nevyhovovaly novým legislativním požadavkům v ochraně ovzduší po roce 1989 (zákon č. 309/91 Sb.).

Problematikou pulzní regenerace průmyslových filtrů se na pracovišti Ústavu techniky prostředí Fakulty strojní ČVUT v Praze zabývá pracovní tým pod vedením doc. Hemerky již od roku 1996. Nejprve jako projekt GA ČR v období 1996–1998, poté v letech 1999–2004 jako součást výzkumného záměru (program MŠMT) Technika prostředí budov, širě zaměřeného do oblasti techniky prostředí.

Pulzní regenerace průmyslových filtrů je složitý děj, kde proud vzduchu, vytékající kritickou rychlostí z výtokové trysky v rozvodné trubce tlakového vzduchu, vstupuje do směšovací trysky umístěné ve výstupním průřezu filtrační hadice a ejekčním účinkem přisává z výstupní komory filtru okolní vyčištěný plynný – obr. 1.

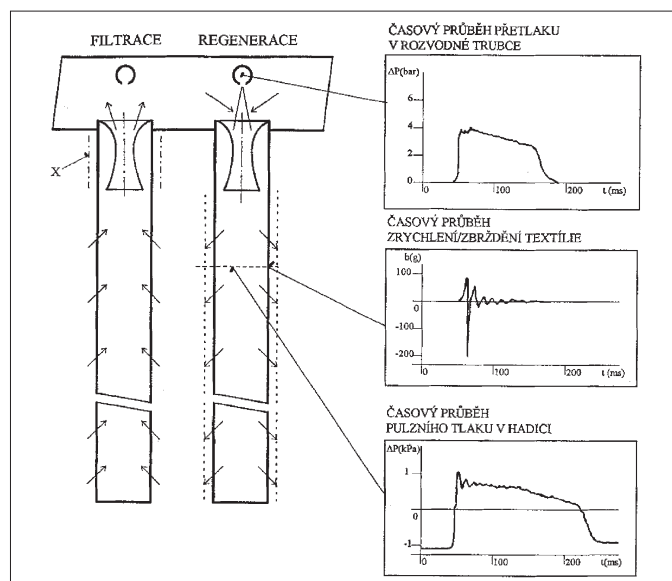
Ve směšovací trysce se kinetická energie plynu mění v tlakovou a na výstupu ze směšovací trysky, uvnitř filtrační hadice, se po krátkou dobu regenerace eliminuje pracovní podtlak filtru a vytváří se pulzní přetlak. Tento tlakový vzruch se šíří po délce filtrační hadice a vyvolává nejenom příčný pohyb filtrační textilie, ale i zpětný proplach po krátkou dobu trvání pulzního přetlaku v hadici. Při pulzní regeneraci se tak na odstranění filtračního koláče z vnější strany filtrační hadice (regeneraci filtrační textilie) podléjí současně dva čisticí mechanismy.

V horní části, kde je pulz dostatečně razantní, je rozhodujícím čisticím mechanismem příčný pohyb textilie. Filtrační hadice se vnitřním přetlakem nejprve prudce nafoukne (vypne) a na jejím povrchu se dosahuje vysokých hodnot zrychlení, řádově desetinásobků tíhového zrychlení. Po vypnutí textilie pak dochází k prudkému zbrzdění. Zde se dosahuje řádově stonásobku záporného tíhového zrychlení, při kterém dochází k překonání adhezních sil a následnému odstranění filtračního koláče. Ve střední a dolní části délky hadice, kde je razance tlakového pulzu, tj. časová změna tlaku, již nižší a dosahované hodnoty zrychlení a zpomalení textilie jsou nízké, je rozhodujícím čisticím mechanismem zpětný proplach, vytvořený po krátkou dobu trvání přetlaku v hadici.

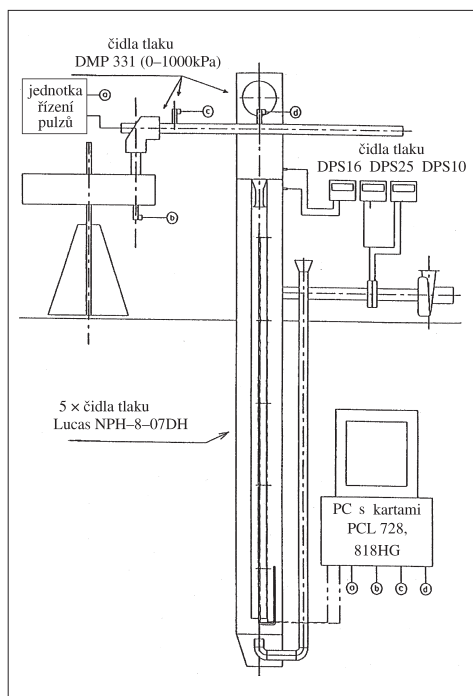
Pulzní regenerace průmyslových filtrů představuje složitý děj s množstvím dílčích problémů. Literární rešerše a podrobný rozbor této problematiky byl uveden v příspěvku [1]. Na základě této rešerše byla stanovena hlavní kritéria k posouzení správnosti funkce regeneračního ústrojí. Tato kritéria vycházejí z průběhů pulzního tlaku uvnitř hadice a lze je charakterizovat jako:

- rychlost nárůstu tlaku v hadici $\Delta(p)/d\tau$ v horní části hadice, kde je rozhodujícím čisticím mechanismem příčný pohyb textilie,
- minimalizace oscilací v průběhu tlaku během regenerace, které mohou způsobit pronikání částic do struktury filtračního materiálu a tím zvýšení trvalé tlakové ztráty filtru,
- minimalizace počáteční oblasti délky hadice, kde se v průběhu regenerace ejekčním účinkem vystupujícího proudu ze směšovací trysky vytváří podtlak a vlastní regenerace je pak méně účinná,
- dosažení dostatečně vysoké hodnoty tlakového impulzu v průběhu regenerace (časový integrál přetlaku v hadici) – toto kritérium se uplatňuje ve střední a spodní části délky hadice, kde rozhodujícím čisticím mechanismem je přetlakem vyvolaný zpětný proplach.

Základním cílem projektu GA ČR v letech 1996–1998 byla optimalizace tvaru regeneračního ústrojí, tj. tvaru směšovací trysky a její vzdálenosti od výtokové



Obr. 1 – Pulzní regenerace průmyslového filtru



Obr. 2 – Schéma zkušebního filtru

vybudování filtračních jednotek k odlučování tuhých příměsí u kotlů menších výkonů na spalování pevných paliv. Základem je jedna filtrační hadice o průměru $D = 127 \text{ mm}$ ($5''$) a délce 2730 mm (filtrační plocha $1,089 \text{ m}^2$), která je zabudovaná do filtrační komory příčného průřezu cca $300 \times 300 \text{ mm}$. Na vstupní (prašné) straně filtru jsou po délce komory umístěny 3 podélné montážní otvory s víky, na výstupní (čisté) straně filtru je na čele komory montážní otvor pro zabudování zkoušených trysek a v horní stěně komory montážní otvor pro zabudování filtrační hadice s opěrnou klecí. Do spodní části vstupní komory je přivedeno vstupní potrubí $\phi 50 \text{ mm}$, které je vně komory vyvedeno svisle vzhůru a slouží pro přívod vzduchu a podávaného prachu. Na zadní stranu výstupní komory je napojeno výstupní potrubí $\phi 50 \text{ mm}$ a měřicí clonková trať stejného průměru s příslušnými čidly tlaku (snímače typu DPS s digitálním displejem). Jako zdroj sání je použit radiální ventilátor UV1 s napětovou regulací.

Zásobník tlakového vzduchu má objem 48 l a svým objemem zhruba odpovídá velikosti zásobníku u reálného filtru s délkou hadic 2730 mm a 10 filtračními hadicemi v jedné řadě, kde tento objem postačí pro regeneraci jedné nebo dvou řad hadic současně. Membránový ventil má velikost $6/4''$ a vychází z něj rozvodná trubka $6/4''$ s 10 výtakovými tryskami ve tvaru válcových otvorů ve stěně s postupně se zmenšujícími průměry ($2 \times 12,5 \text{ mm}$, $6 \times 12 \text{ mm}$ a $2 \times 11,5 \text{ mm}$), které u reálného filtru zajišťují rovnoměrnou regeneraci u všech filtračních hadic v řadě. Rozvodná trubka prochází výstupní komorou zkušebního filtru a pro vlastní experimenty se využívá pouze výtoku z jednoho „reprezentativního“ otvoru a výtok z ostatních otvorů je veden mimo vlastní zkušební zařízení. Výšku rozvodné trubky a tím i vzdálenost od ústí směšovací trysky lze měnit posuvem bočních přírub.

Uvnitř hadice je v roztečných vzdálenostech 500 mm (cca $4D$) zabudováno celkem 5 čidel tlaku NPH v provedení pro snímání diferenčního tlaku s rozsahem do 7 kPa . Čidla jsou jedním koncem napojena na trubku, která prochází dnem filtrační hadice a je zaústěna do meziprostoru mezi hadicí a skříni filtru. Tímto zapojením se čidly snímá rozdíl tlaků mezi vnitřní a vnější stranou filtrační hadice, přičemž vnější tlak je společný pro všechna čidla. Trubku s napojenými čidly lze ve svislém směru v určitém rozsahu posunovat a tak zajistit, že při použití libovolné směšovací trysky je první čidlo tlaku umístěno vždy ve stejné vzdálenosti 200 mm (cca $1,6D$) od výstupní hrany trysky.

Projekt měření s použitím počítače vycházel z produktů firmy Advantech (8 kanálová karta PCL 818HG s maximální vzorkovací frekvencí 100 kHz , napájecí karty PCL 727 a 728) a software SPURT pro rychlé děje firmy Easy Control, s.r.o., Plzeň.

trysky, která vede k optimálnímu využití energie tlakového vzduchu pro regeneraci a tím k úspoře provozních nákladů při filtraci.

Pro tyto účely bylo na našem pracovišti vybudováno experimentální zařízení, umožňující sledovat optimalizaci tvaru regeneračního ústrojí. Zkušební filtr je schematicky znázorněn na obr. 2.

Vychází z reálných dílů základního modulu průmyslového filtru s pulzní regenerací, který se běžně používá pro

Výsledky řešení projektu GA ČR, tj. optimalizace tvaru směšovací trysky její a vzdálenosti od výtokové trysky, byly podrobně popsány v [2].

K hodnocení jednotlivých alternativ uspořádání regeneračního ústrojí, tj. tvaru směšovací trysky a její vzdálenosti od výtokové trysky, byl vytvořen bodový hodnotící systém, kterým se na základě zjištěných průběhů tlaků $\Delta p(\tau)$ ve třech vzdálenostech od směšovací trysky hodnotí vybraná hlediska vycházející z výše uvedených kritérií. Tato hlediska, jejichž význam je zároveň zřejmý z obr. 3, jsou:

- změna počátečního nárůstu tlaku v čidle č. 1 $\Delta(\Delta p_1)/\Delta\tau$, umístěném 200 mm od výstupního průřezu dané směšovací trysky, která má přímý vliv na dosahované příčné zrychlení pohybu textilie;
- maximální dosažený tlak v čidle č. 1 $\Delta p_{1,max}$, který svědčí o funkci směšovací trysky a účinnosti přeměny kinetické energie v tlakovou;
- hledisko záporných hodnot v časovém průběhu $\Delta p(\tau)$ v blízkosti směšovací trysky, vyjádřené střední hodnotou tlaku $\Delta p_{1,στ}$ v čidle č. 1 po dobu trvání pulzu, resp. hodnotou tlakového impulsu $f\Delta p_1 d\tau$;
- hledisko vyvolaného zpětného proplachu ve střední části délky hadice, vyjádřené hodnotou tlakového impulsu $f\Delta p_3 d\tau$ v čidle č. 3, vzdáleném 1200 mm ($9,5D$) od výstupního průřezu trysky;
- hledisko vyvolaného zpětného proplachu ve spodní části délky hadice, vyjádřené hodnotou tlakového impulsu $f\Delta p_5 d\tau$ v čidle č. 5, vzdáleném 2200 mm ($17D$) od výstupního průřezu trysky;
- hledisko oscilací tlaku v časovém průběhu $\Delta p(\tau)$, vyjádřené poměrem maximální amplitudy tlaku $\delta(\Delta p_1)_{max}$ k maximálnímu dosaženému tlaku v čidle č. 1 $\Delta p_{1,max}$, kde jsou oscilace nejvýraznější.

U vytvořeného bodového hodnotícího systému mají všechna hlediska stejnou váhu.

PULZNÍ REGENERACE A OBJEM FILTRU

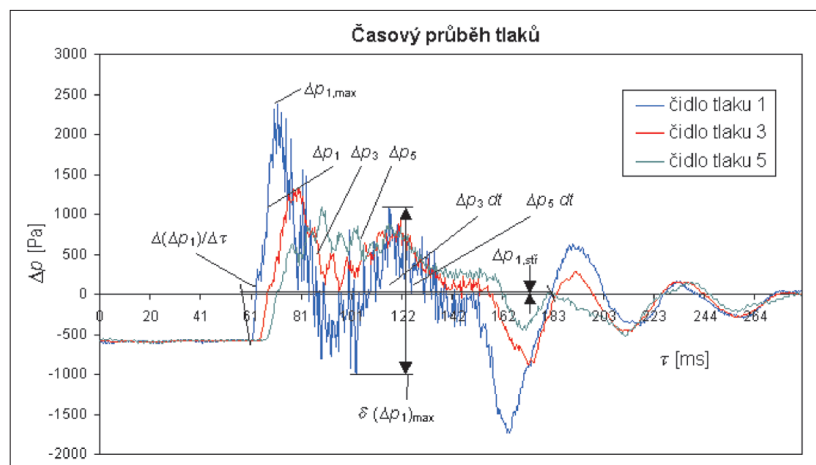
Již v průběhu experimentů v etapě řešení optimalizace tvaru regeneračního ústrojí bylo zjištěno, že snímané průběhy pulzních tlaků závisí na objemu vstupní (znečištěné) a výstupní (čisté) části filtru. Na základě těchto poznatků bylo experimentální zařízení upraveno a vstupní i výstupní část filtru byla vybavena přídatnými díly – komorami, připevněnými na montážní otvory, kterými se objem filtru rozšířil až na hodnoty, které se blíží podmínkám u reálných filtrů při regeneraci jedné řady filtračních hadic.

Základní objem vstupní části filtru (alternativa **a**) činil 316 l . Se třemi přídatnými komorami (každá o objemu 110 l), vznikla alternativa vstupu **c** s celkovým objemem 646 l a v případě, kdy komory byly v jedné polovině objemu přehrazeny přepážkou, vznikla alternativa **b** s objemem 481 l . Výstupní část filtru měla původní objem 60 l (alternativa **A**) a s přídatnou komorou 40 l dosáhl objem 100 l (alternativa **B**). S takto upraveným experimentálním zařízením bylo možno provést sérii experimentů se 6 různými alternativami uspořádání vstupu a výstupu (tab. 1) a posoudit vliv objemů u účinnost pulzní regenerace, vyjádřenou hodnotícím systémem [3].

Tab. 1 – Přehled a označení alternativ uspořádání vstupu a výstupu zkušebního filtru

Objem na výstupu filtru	Objem na vstupu filtru		
	a 316 l	b 481 l	c 646 l
A 60 l	Alt. A-a	Alt. A-b	Alt. A-c
B 100 l	Alt. B-a	Alt. B-b	Alt. B-c

Vytvořený bodový hodnotící systém spočívá v bodovém ocenění jednotlivých hledisek A – F. Rozsahy měřených hodnot u jednotlivých hledisek, se kterými jsme se setkali již v předcházející etapě experimentů při optimalizaci tvaru regeneračního ústrojí, byly lineárně rozděleny do 5 intervalů a každému intervalu byl přiřazen počet bodů od 1 do 5. Čím vyšší je hodnota hlediska A – E, tím vyšší je jeho ocenění počtem bodů. U hlediska F je tomu naopak – bodové ocenění



Obr. 3 – Průběhy pulzních tlaků v čidlech č. 1, 3 a 5 a význam hodnotících hledisek

se zvyšuje se snižující se hodnotou hlediska F. U hodnotícího systému mají všechna hlediska stejnou váhu. Jako nejlepší je hodnocena alternativa s nejvyšším celkovým počtem bodů.

Rozsahy měřených hodnot a počty bodů u jednotlivých hledisek jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2 – Bodové ocenění jednotlivých hledisek

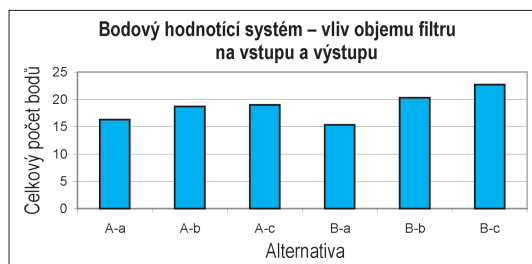
Počet bodů	1	2	3	4	5
Hledisko A $\Delta(\Delta p_1)/\Delta \tau$ [Pa/ms]	≤ 300	301 až 350	351 až 400	401 až 450	> 450
Hledisko B $\Delta p_{1,max}$ [Pa]	≤ 2500	2501 až 3000	3001 až 3500	3501 až 4000	> 4000
Hledisko C $f\Delta p_1, d\tau$ [Pa.s]	$\leq (-40)$	(-39) až (-30)	(-29) až (-20)	(-19) až (-10)	$> (-10)$
Hledisko D $f\Delta p_3, d\tau$ [Pa.s]	≤ 45	46 až 50	51 až 55	56 až 60	> 60
Hledisko E $f\Delta p_5, d\tau$ [Pa.s]	≤ 45	46 až 50	51 až 55	56 až 60	> 60
Hledisko F $\delta(\Delta p_1)_{max}/\Delta p_{1,max}$ []	$\geq 1,25$	1 až 1,24	0,75 až 0,99	0,5 až 0,74	$< 0,5$

Experimenty proběhly za následujících podmínek:

- ❑ jako směšovací tryska byla použita Venturiho tryska s průměrem hrdla 48 mm,
- ❑ mezi výtokovou tryskou a ústím Venturiho trysky byla nastavena vzdálenost $L = 135$ mm,
- ❑ průtok filtrem byl udržován konstantní, odpovídající filtrační rychlosti 2 cm/s,
- ❑ jako zkušební prach pro zanášení filtru byl použit elektrérenský popílek s hmotnostním mediánem 7 μm ,
- ❑ filtr byl před regenerací zanesen na hodnotu plošné hustoty filtračního koláče 460 g/m^2 ,
- ❑ pro regeneraci byl použit tlakový vzduch o přetlaku v zásobníku $\Delta p_{z\acute{a}s} = 0,6$ MPa,
- ❑ ovládací elektrický signál pro otevření solenoidového ventilu byl nastaven na hodnotu $\Delta \tau_{el} = 50$ ms,
- ❑ každá alternativa byla proměřena 3x a pro výsledné hodnocení byla použita střední aritmetická hodnota z jednotlivých měření.

Výsledky hodnocení jsou vyjádřeny ve formě sloupcového diagramu na obr. 4.

Výsledky měření ukázaly, že objemy filtru na čisté výstupní části a prašné vstupní části významným způsobem ovlivňují chování filtru při jeho pulzní regeneraci. V případě alternativ bez dodatečné komory na výstupu filtru (alternativa **A**) je vliv zvětšení objemu na vstupu filtru na výsledky hodnocení zřetelný, ale poměrně slabý. V případě alternativy filtru s dodatečným objemem na výstupu



Obr. 4 – Výsledky bodového hodnocení zkoušených alternativ uspořádání filtru

(alternativa **B**) však byl zjištěn výrazný kladný vliv zvětšení objemu na vstupu na výsledky hodnocení. Jako nejlepší byla hodnocena alternativa se zvětšeným objemem na výstupu a největším objemem na vstupu (alternativa **B-c**). Výrazným pozitivním znakem této alternativy uspořádání filtru je její přijatelné hodnocení podle všech hodnotících hledisek A – F a tudíž i přijatelná funkce obou čistících mechanismů, které působí při regeneraci.

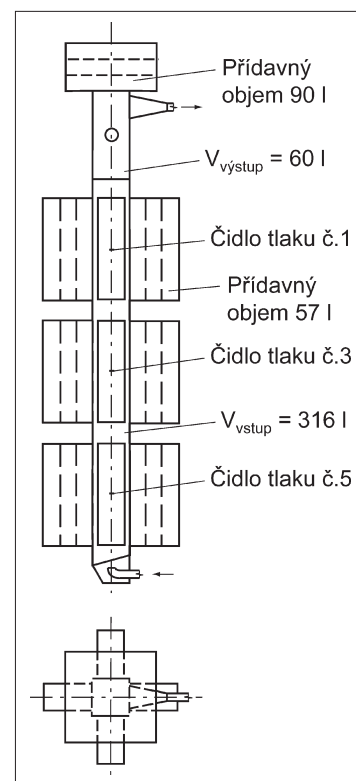
Vysvětlení chování filtru během regenerace při změně objemu filtru na vstupu i výstupu je jednoduché. Čím menší je objem filtru na výstupu, tím menší je hmotnost přisátého vzduchu do směšovací trysky a čím menší je objem filtru na vstupu, tím vyšší se vytváří během regenerace protitlak v prostoru mezi filtrační textilí a pláštěm filtru, který pak působí na snížení rozdílového tlaku na obou stranách filtrační textilie, který rozhoduje o účinnosti pulzní regenerace. Z uvedené hypotézy vyplývá závěr, že čím větší je objem filtru na obou jeho stranách, tím účinnější je pulzní regenerace. Tento náš závěr je však v rozporu s praxí návrhářů a výrobců filtrů, kteří se snaží minimalizovat objemy filtru na jednotku filtrační plochy.

Výsledky této etapy zkoušek byly publikovány na mezinárodní konferenci Air Pollution 2003 [4] a vzbudily zájem odborné veřejnosti. Diskuse na konferenci nás přesvědčila, že se jedná o důležitý poznatek, kterému není v odborné literatuře věnována pozornost a že je třeba se vlivem objemu filtru na jeho chování při pulzní regeneraci podrobněji zabývat.

REKONSTRUKCE ZKUŠEBNÍ TRATI

První získané výsledky vlivu objemu prostorů na vstupu a výstupu filtru na účinnost pulzní regenerace ukázaly na kvalitativní, a bodovým hodnotícím systémem oceněný i kvantitativní vliv objemu filtru na průběh pulzní regenerace.

Nedostatkem předcházející etapy experimentů byla úprava zkušebního filtru s nesymetrickým uspořádáním přídavných komor na vstupu, která mohla ovlivnit vytváření protitlaku v prostoru mezi filtrační textilí a pláštěm filtru a s ohledem na způsob snímání tlaku i jeho hodnocení. Z grafického vyjádření výsledků měření a trendů závislostí na obr. 4 dále vyplývá, že s dalším zvětšováním objemů na vstupu i výstupu lze očekávat další zvyšování celkového hodnocení zkoušené alternativy. Z těchto důvodů byla navržena a realizována rekonstrukce experimentálního filtru, která respektu-



Obr. 5 – Schéma rekonstrukce zkušebního filtru

je výše uvedené nedostatky předcházející etapy experimentů. Schéma rekonstrukce zkušební filtru je uvedeno na obr. 5.

Rekonstruovaná skříň filtru má přídatné objemy na vstupu umístěné po délce filtru na třech úrovních symetricky do čtyř stran. Celkový objem dvanácti komor je 684 l, což spolu s původním objemem filtru na vstupu 316 l vytváří maximální objem 1000 l. Objem jedné komory (57 l) je pak možno přestavitelnou přepážkou zmenšit buď o 1/3 na 38 l nebo o 2/3 na 19 l. Uspořádání vstupu tak poskytuje čtyři alternativy velikosti objemu prostoru na vstupu filtru – alternativu **a** s objemem 316 l, alternativu **b** s objemem 544 l, alternativu **c** s objemem 772 l a **d** s 1000 l.

Rekonstruovaná komora na výstupu filtru má celkový přídatný objem 90 l. Původní objem je 60 l a maximální objem na výstupu filtru tak činí 150 l. Komoru je opět možné po třetinách přepažit na objem 60 l nebo na 30 l. Vznikají tak také čtyři alternativy velikosti objemu prostoru na výstupu filtru, alternativa **A** s objemem 60 l, alternativa **B** s objemem 90 l, alternativa **C** s objemem 120 l a **D** se 150 l. Kombinací vstupu a výstupu vzniká celkem šestnáct alternativ uspořádání filtru – tab. 3.

Tab. 3 – Přehled a označení alternativ uspořádání vstupu a výstupu rekonstruovaného filtru

Objem na výstupu filtru	Objem na vstupu filtru			
	a 316 l	b 544 l	c 772 l	d 1000 l
A 60 l	A-a	A-b	A-c	A-d
B 90 l	B-a	B-b	B-c	B-d
C 120 l	C-a	C-b	C-c	C-d
D 150 l	D-a	D-b	D-c	D-d

Při rekonstrukci byly do skříňe filtru vyřezány otvory a připevněny šrouby pro snadnou montáž komor a zaslepovacích vík. Těsnění mezi skříňí filtru a přírubou komory a utěsnění přepážek v komoře je provedeno gumovým samolepicím těsněním.

Systém snímání tlaků zůstal nezměněn.

Pro porovnání s reálnými filtry je nutno chápat uvedené rozsahy objemů na vstupu a výstupu jako hodnoty měrných objemů, tj. objemů připadajících na jednu regenerovanou filtrační hadici. U reálných hadicových filtrů, kde současně regeneruje nejméně jedna řada filtračních hadic, je třeba skutečný objem skříňe filtru na vstupu i výstupu podělit skutečným počtem současně regenerovaných hadic. U objemu na vstupu je třeba zvážit i další vlivy, jako stínící efekt ostatních filtrujících hadic, bránící využití celého objemu filtru, dále krajní poloha řady hadic ve skříňi. S uvažováním těchto korekcí je možno konstatovat, že hodnoty měrných objemů u zkušební filtru pokrývají a překračují rozsah měrných objemů u reálných filtrů.

PODMÍNKY EXPERIMENTU A VÝSLEDKY MĚŘENÍ

V porovnání s předcházející etapou zkoušek byl upraven režim zanášení filtru zkušebním prachem na stejnou hodnotu tlakového rozdílu 700 Pa na dělicí rovině filtru. K této úpravě nás vedla zkušenost z předcházející etapy zkoušek, kdy filtr byl sice zanášen stejným množstvím zkušební prachu 500 g, kterému odpovídá jmenovitá hodnota hustoty filtračního koláče 460 g/m², ale konečná hodnota snímaného tlakového rozdílu na dělicí rovině filtru se u jednotlivých měření lišila až o několik set Pa. Tyto rozdíly byly způsobeny nedo-

Tab. 4 – Bodové ocenění jednotlivých hledisek u rekonstruované zkušební trati

Počet bodů	1	2	3	4	5
Hledisko A $\Delta(\Delta p_1)/\Delta \tau$ [Pa/ms]	212 až 275,3	275,3 až 338,6	338,6 až 401,9	401,9 až 465,2	465,2 až 528,5
Hledisko B $\Delta p_{1,max}$ [Pa]	2050 až 2225	2225 až 2390	2390 až 2555	2555 až 2720	2720 až 2885
Hledisko C $f\Delta p_1 \cdot d\tau$ [Pa.s]	-8,8 až (-4,3)	-4,3 až 0,1	0,1 až 4,5	4,5 až 8,9	8,9 až 13,3
Hledisko D $f\Delta p_3 \cdot d\tau$ [Pa.s]	34,3 až 37,4	37,4 až 40,5	40,5 až 43,6	43,6 až 46,7	46,7 až 49,8
Hledisko E $f\Delta p_5 \cdot d\tau$ [Pa.s]	37,4 až 40,8	40,8 až 44,2	44,2 až 47,6	47,6 až 51,0	51,0 až 54,4
Hledisko F $\delta(\Delta p_1)_{max}/\Delta p_{1,max}$ [%]	0,87 až 0,95	0,79 až 0,87	0,71 až 0,79	0,63 až 0,71	0,55 až 0,63

konalým rozptýlením podávaného zkušební prachu do proudu přiváděného vzduchu a následným vypadáváním shluků prachu z proudu vzduchu na vstupu do filtru. Protože funkce směšovací trysky a tím i celého regeneračního ústrojí závisí na odporu zanesené filtrační textilie, byly podmínky zanášení filtru upraveny na dosažení konstantního tlakového rozdílu na dělicí rovině filtru.

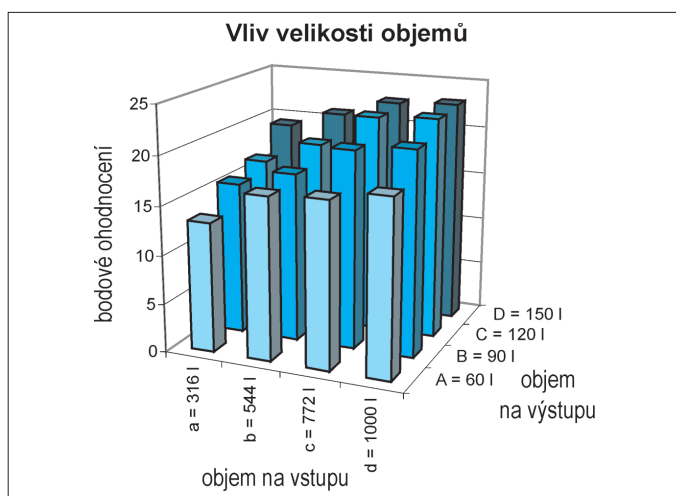
Z provozních důvodů byl snížen přetlak tlakového vzduchu v zásobníku na hodnotu 0,5 MPa. Původní hodnotu 0,6 MPa nebylo možno s ohledem na nastavení pojistného ventilu u zdroje tlakového vzduchu jednoduše dosáhnout.

Zejména změnou přetlaku vzduchu v zásobníku vznikla situace, kdy nelze přímo porovnávat výsledky předcházející etapy zkoušek se zkouškami na rekonstruovaném filtru. Tato skutečnost nás vedla k dalšímu důležitému rozhodnutí. Původní rozsahy měřených hodnot a bodové ocenění jednotlivých hledisek (tab. 2), které byly stanoveny rozdělením rozsahů měřených veličin již v etapě zkoušek optimalizace tvaru regeneračního ústrojí, byly nově přizpůsobeny měřeným hodnotám v této etapě zkoušek. Nové rozsahy měřených hodnot a bodové ocenění jednotlivých hledisek je uvedeno v tab. 4.

Nové rozsahy přesně odpovídají lineárním rozdělení nejvyšší a nejnižší hodnoty hlediska na 5 intervalů. U této série experimentů se tak setkáme u každého hlediska s jeho hodnocením nejnižším počtem bodů 1 u nejhůře hodnocené

Tab. 5 – Výsledky bodového hodnocení alternativ uspořádání vstupu a výstupu filtru

Hledisko	A	B	C	D	E	F	Celkové hodnocení průměr
	Průměrné bodové ohodnocení dle jednotlivých hledisek						
A-a	3	3,67	3	1	1	1,67	13,34
A-b	1,33	2,67	5	2	2	3,67	16,67
A-c	2,33	1,33	4,67	3	3	2,67	17,00
A-d	2,33	1,67	5	2,33	2,33	4,33	17,99
B-a	1,67	3,33	2,67	2	2	4	15,67
B-b	2,33	1,67	3,67	3,33	3	3,33	17,33
B-c	1,33	4	4	4,67	4	2,33	20,33
B-d	3	2,67	4,33	3,33	3,67	4	21,00
C-a	4,33	2,67	1,67	2	2,33	3,67	16,67
C-b	2	3	3,67	4	3,33	3	19,00
C-c	2,67	2	4	5	4,67	4	22,34
C-d	3,67	2,33	3,67	4,33	4,33	4,33	22,67
D-a	4,67	4	1,33	2,67	2,67	4	19,34
D-b	4	2	3,33	4	4	3,67	21,00
D-c	2	3,33	3,33	5	5	4	22,67
D-d	4,33	2	3	4,67	4,67	4,33	23,00



Obr. 6 – Celkové vyjádření vlivu objemu na bodové hodnocení (průměrné hodnoty)

alternativy uspořádání filtru až nejvyšším počtem bodů 5 u nejlépe hodnocené alternativy podle daného hlediska. Tímto novým opatřením došlo k výrazné diferenciaci a rozlišení vlivu jednotlivých hledisek na celkové hodnocení zkoušené alternativy. Nemůže již nastat situace, kde všechny zkoušené alternativy u předcházející etapy zkoušek byly u určitého hlediska oceněny počtem bodů 4 až 5.

Sérii těchto experimentů je tak nutno chápat jako samostatnou etapu zkoušek, podrobně zaměřenou na posouzení vlivu objemu filtru v širokém rozsahu hodnot na účinnost pulzní regenerace, vyjádřenou bodovým hodnotícím systémem. S ohledem na změny podmínek experimentu i úpravu bodového hodnotícího systému nelze výsledky této etapy přímo porovnávat s výsledky předcházející etapy.

Výsledky měření

Výsledky bodového hodnocení jednotlivých alternativ uspořádání vstupu a výstupu filtru jsou shrnuty v tab. 5. V tabulce je vždy uvedeno průměrné bodové hodnocení jak dle jednotlivých hledisek, tak i průměrné celkové hodnocení vždy ze 3 provedených měření téže alternativy. Např. u alternativy **D-c** je uvedeně průměrné bodové hodnocení u hlediska C = 3,33 aritmetický průměr z hodnot 4, 3 a 3 body a celkové hodnocení 22,67 bodů je aritmetický průměr z hodnot 22, 22 a 24 bodů.

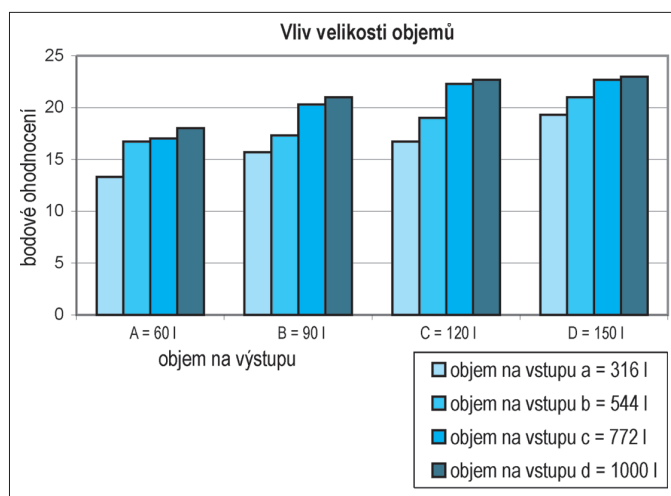
Graficky jsou výsledky vyjádřeny ve sloupcových diagramech na obr. 6 a 7.

ZÁVĚR

Alternativou s nejvyšším bodovým hodnocením je alternativa **D-d** s největším objemem na vstupu i výstupu filtru. Z výsledného hodnocení v tab. 5 i z grafického vyjádření výsledků vyplývá, že jak velikost objemu na vstupní straně filtru, tak i velikost objemu na výstupní straně filtru pozitivně ovlivňuje výsledné bodové hodnocení alternativy uspořádání filtru. Každé zvětšení objemu ať na vstupu nebo na výstupu vede ke zvýšení celkového bodového hodnocení alternativy. Gradient změny bodového hodnocení v oblasti větších objemů je nižší než gradient změny v oblasti menších objemů.

Výsledky této etapy zkoušek potvrdily závěry z předcházející etapy, uskutečněné při nesymetrickém uspořádání přidavných komor na vstupu filtru. Výsledky potvrdily hypotézu, vyslovenou v závěru kapitoly „Pulzní regenerace a objem filtru“.

Vytvořený bodový hodnotící systém a výsledné hodnocení jako součet hodnocení jednotlivých hledisek je možno považovat za **míru účinnosti pulzní regenerace hadicových filtrů**. Čím vyšší je bodové hodnocení alternativy uspořádání, tím vyšší je účinnost pulzní regenerace. Tuto účinnost je zde nutno chápat jako využití energie tlakového vzduchu pro odstranění filtračního koláče, mající přímou vazbu na měrnou spotřebu tlakového vzduchu



Obr. 7 – Celkové vyjádření vlivu objemu na bodové hodnocení (průměrné hodnoty)

a provozní tlakovou ztrátu filtru. Obojí pak přímo ovlivňuje provozní náklady na filtraci.

V navazující etapě výzkumu bude věnována pozornost objasnění hypotézy o vlivu objemu filtru na vstupu i výstupu na charakter průběhu diferenčního tlaku, snímaného na různých úrovních délky hadice a vstupujícího do bodového hodnocení zkoušené alternativy uspořádání. Systém přímého měření diferenčních tlaků bude změněn na systém současného měření jeho složek, tj. tlaků uvnitř hadice oproti barometrickému tlaku a tlaku v komoře filtru oproti barometrickému tlaku. Tímto způsobem bude možno více rozlišit vliv změny objemu filtru na výstupu na změnu pulzního tlaku uvnitř hadice a vliv změny objemu na vstupu na vytvoření protitlaku v prostoru mezi filtrační hadicí a stěnou komory filtru.

Spojení na autory: jiri.hemerka@fs.cvut.cz, pavel.vybiral@fs.cvut.cz

Poděkování:

V letech 1999–2004 byl výzkum podpořen z prostředků projektu MŠMT č. MSM 210000011 *Technika prostředí budov a v roce 2004 rovněž z projektu IGS ČVUT v Praze č. CTU 0405612. Rekonstrukce zkušební trati byla v roce 2004 podpořena z rozvojového projektu FRVŠ č. G1-1989.*

Použitá zdroje:

- [1] Doubek, P., Hemerka, J., Hejma, J.: Pulzní regenerace průmyslových filtrů, *Ochrana ovzduší*, č. 4, 1997, s. 19-22
- [2] Hemerka, J., Doubek, P., Hofmann, P., Hejma, J.: Optimalizace geometrického uspořádání regeneračního ústrojí průmyslových filtrů s pulzní regenerací, *Ochrana ovzduší*, č. 2, 1999, s. 7-11
- [3] Adámek, V.: Zlepšení funkce průmyslových filtrů s pulzní regenerací, *Diplomová práce*, Fakulta strojní ČVUT v Praze, 2000
- [4] Hemerka, J., Vybiral, P., Adámek, V.: Improvement of pulse-jet cleaning of industrial filters, *Sborník mezinár. konference Air Pollution 2003 – Catania*, WIP Press, Southampton, 2003, s. 495-504. ■

* Kogenerační minijednotky

Skupina *Vaillant Hepworth* oznámila, že vyvinula plynové kogenerační jednotky „ecopower“ s rozsahem el. výkonů 1,3 až 4,7 a tepelných výkonů 4,0 až 12,5 kW. Ve vývoji techniky palivových článků je firma *Vaillant* považována za vedoucí v Evropě. První ověřovací série byla uvedena na trh v r. 2004.

Ukončený vývoj má jednotka *Steam Cell* s rozsahem el. výkonů 0,5 až 6,0 a tepelných výkonů 2 až 25 kW, jejíž prototyp má za sebou již 35 000 zkušebních provozních hodin.