

## ROZDĚLENÍ ČIŠTĚNÉHO PLYNU V TKANINOVÝCH FILTRECH

Tomáš Hlinčík, Václav Koza

VŠCHT Praha, Ústav plynárenství, koksochemie a ochrany ovzduší, Technická 5, 166 28, Praha 6  
tel.: 220 444 073, tomas.hlincik@vscht.cz

*Při osazování tkaninových filtrů plynů je činnost filtrů ovlivňována geometrií přívodu znečištěného a odvodu čistého plynu. Článek prezentuje metodu pro ohodnocení těchto vlivů pomocí CFD (computational fluid dynamics, počítačová simulace proudění). Přínosem metody je zjednodušení modelu vnitřku filtru při zachování vypovídací schopnosti k vlivům uspořádání přívodů. Model je uplatněn na studium vlivu umístění přívodů plynu k filtru, vlivu odporu filtračních přepážek a vlivu celkového toku čištěného plynu filtrem.*

Došlo 22. 6. 2011, přijato 8. 8. 2011

### 1. Úvod

Tkaninové filtry s vertikálními rukávci rozdělené do sekcí svislými přepážkami někdy vykazují nerovnoměrné rozdělení čištěného plynu do jednotlivých sekcí. To se projevuje nerovnoměrným opotřebením jak nosné konstrukce, tak rukávců a zkrácením životnosti.

Při dané konstrukci se během pracovního cyklu rovnoměrnost rozdělení plynu mění. Rukávce, ke kterým byl zpočátku volnější přítok čištěného plynu, se rychleji zanášejí, jejich odpor roste a plyn se přesouvá k dalším, zatím čistším, rukávcům. Nerovnoměrné zatížení rukávců a komor se však tímto procesem nikdy úplně nevykompenzuje.

Prvotní vliv na rozdělení plynu mezi komory má vzájemné uspořádání přívodu a odtahu čištěného plynu, které je mnohdy nutno volit s ohledem na vestavění filtru do prostoru, který je k dispozici a ne jen na základě představy o optimální funkci filtru.

Rovnoměrnost rozdělení plynu se vylepšuje různými konstrukčními úpravami distribuce přiváděného plynu do komor. Jednoduchý dvojrozměrný CFD model řešený programem Fluent 6, který prezentujeme na příkladu šestikomorového filtru, umožňuje posoudit základní vlastnosti konstrukce filtru a vliv případných konstrukčních úprav distribuce přiváděného plynu. Rovněž lze jednoduše srovnat chování filtru v celém rozsahu průtoků plynu (např. v regulačním rozsahu předřazeného topeniště).

### 2. CFD metoda modelování transportních procesů v plynoměru

Pro simulaci transportu proudění v tkaninovém filtru jsme použili metodu CFD – Computational Fluid Dynamics. Při použití CFD metody je potřeba nejprve vytvořit model tj. virtuální prototyp zkoumaného tkaninového filtru, na kterém byla realizována výpočtová síť s dostatečnou hustotou, aby výpočet konvergoval z důvodu úzkých štěrbin. Na obrázku 1 je uvedena ukázka vysítované plochy tkaninového filtru.

Na tento model se následně aplikují matematické postupy tak, aby ze zadaných okrajových podmínek a počítačových podmínek byly získány údaje o dějích probíhajících v celé zkoumané oblasti při respektování fyzikálních zákonů. CFD je založen na řešení fundamentálních nelineárních rovnic popisujících proudění

tekutin a turbulence na konečném počtu malých objemů. Pro každý objem je počítán transport hmoty a hybnosti na základě:

- Rovnice kontinuity

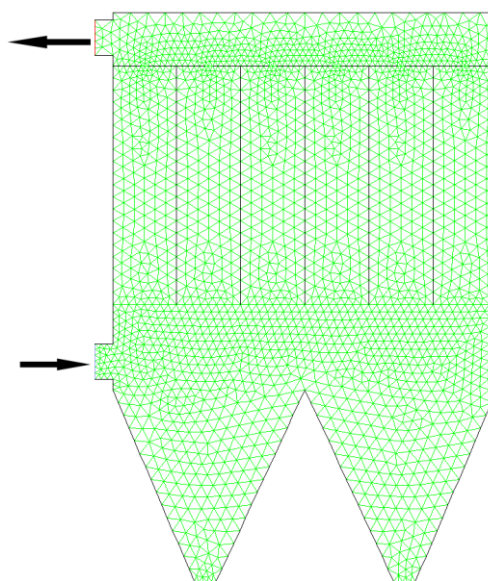
$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = 0. \quad (1)$$

- Navier – Stokesových rovnice

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_i v_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_i, \quad (2)$$

V rovnicích je  $\rho$  hustota,  $v$  vektor rychlosti,  $p$  tlak,  $\tau$  tenzor Reynoldsových napětí,  $f$  vliv tíhových sil [1, 2].

Uvedený systém parciálních diferenciálních rovnic je řešený numerickou metodou konečných objemů na oblasti a s okrajovými podmínkami odpovídajícími modelovanému systému. Při výpočtu byl použit RNG  $k$ - $\varepsilon$  model turbulence, kde  $k$  je rychlost tvorby turbulence energie a  $\varepsilon$  rychlost její disipace [3].

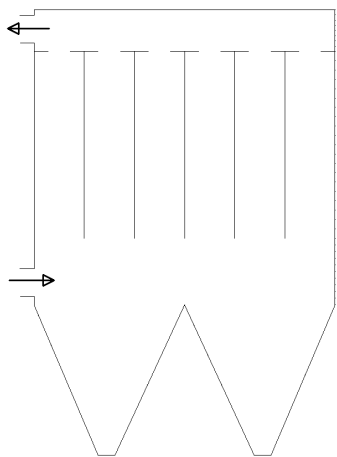


Obr. 1 Ukázka vysítované plochy tkaninového filtru

Pro simulační výpočty byl použit software FLUENT 6. FLUENT 6 je CFD program umožňující komplexní řešení úloh z oblasti proudění. Program umožňuje jak stacionární, tak i nestacionární analýzu 2D i 3D problémů a následnou kvalitní vizualizaci výsledků. V našem případě jsme z možností FLUENTu využili modelování stacionárního dvojrozměrného (2D) problému v pravoúhlých souřadnicích.

### 3. Model filtru

Šestikomorový filtr podle schematického obrázku 2 má v každé komoře shodný počet rukávců zavěšených z osazovací desky. Čištěný plyn se přivádí vstupním hrdlem o průřezu  $S_i$  [m<sup>2</sup>] pod komory a po vyčištění odvádí výstupním hrdlem o průřezu  $S_e$  [m<sup>2</sup>] nad osazovací deskou. Umístění výstupního hrdla na stejné nebo opačné straně filtru s hrdlem vstupním ovlivňuje rozdělení plynu mezi komory, podobně jako případně vestavby pod komorami a tvar výsypek pro zachycené částice.



**Obr. 2** Řez tkaninovým filtrem (zjednodušení osazovací desky na 1 otvor/komora)

Průtok čištěného plynu do filtru je charakterizován střední rychlostí  $v_i$  [m/s] a hustotou (čistého) plynu  $\rho$  ve vstupním hrdle,

$$\dot{V}_i = v_i S_i, \quad (3)$$

kde

$\dot{V}_i$  ... objemový tok plynu na vstupu [m<sup>3</sup>/s]

$v_i$  ... střední rychlost ve vstupním hrdle [m/s]

$S_i$  ... průřez vstupního hrdla [m<sup>2</sup>],

případně

$$\dot{m}_i = \dot{V}_i \rho, \quad (4)$$

kde

$\dot{m}_i$  ... hmotnostní tok čistého plynu na vstupu [kg/s],

$\rho$  ... hustota čistého plynu ve vstupním hrdle [kg/m<sup>3</sup>].

Tok plynu se rozdělí mezi komory filtru tak, že tok  $j$ -tou komorou je

$\dot{V}_{k,j}$  ... objemový tok čistého plynu  $j$ -tou komorou [m<sup>3</sup>/s],  $j = 1, 2, \dots, 6$

$\dot{m}_{k,j}$  ... hmotnostní tok čistého plynu  $j$ -tou komorou [kg/s],  $j = 1, 2, \dots, 6$ .

Rozdělení plynu mezi komory filtru je dáno konstrukcí pod komorami, paralelně zapojenými hydraulickými odpory jednotlivých rukávců podle jejich okamžitého stavu a případně dynamickými účinky plynu proudícího nad rukávci k výstupnímu hrdlu filtru.

#### 3.1. Hydraulický ekvivalent v jedné komoře

V  $j$ -té komoře [ $j = 1, 2, \dots, 6$ ] filtruje plyn  $n$  rukávců. Průtok plynu komorou a tedy i všemi rukávci celkem je výše zavedený  $\dot{V}_{k,j}$ . Nahradíme spojené chování všech rukávců v  $j$ -té komoře [ $j = 1, 2, \dots, 6$ ] vždy jedním ekvivalentním otvorem v osazovací desce o průřezu  $S_{p,j}$  [m<sup>2</sup>], který při průtoku danou komorou vykazuje stejnou tlakovou ztrátu  $\Delta p_{p,j}$  jako rukávce v  $j$ -té komoře [ $j = 1, 2, \dots, 6$ ],

$$S_{p,j} = \dot{V}_{k,j} \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta p_{p,j}}}. \quad (5)$$

#### 3.2. Dvojrozměrný model filtru

Pro účely CFD výpočty nahradíme filtr vertikálním řezem a předpokládáme tloušťku řezu 1 m. Rozměry filtru a vestaveb pak budou stejné jako ve skutečnosti, rozměry otvorů vstupního a výstupního hrdla a ekvivalentních otvorů v osazovací desce číselně rovny průměrům těchto otvorů.

Model CFD má oblast řešení a charakter okrajových podmínek daný uvedenou geometrií filtru, okrajovou podmínkou ve vstupním hrdle je zadaná střední rychlost  $v_i$  a ve výstupním hrdle konstantní absolutní tlak. Médium je vzduch o zadané hustotě plynu  $\rho$ , tj. i odpovídající provozní teplotě filtru. Energetická bilance (sdílení tepla) není v modelu zahrnuta.

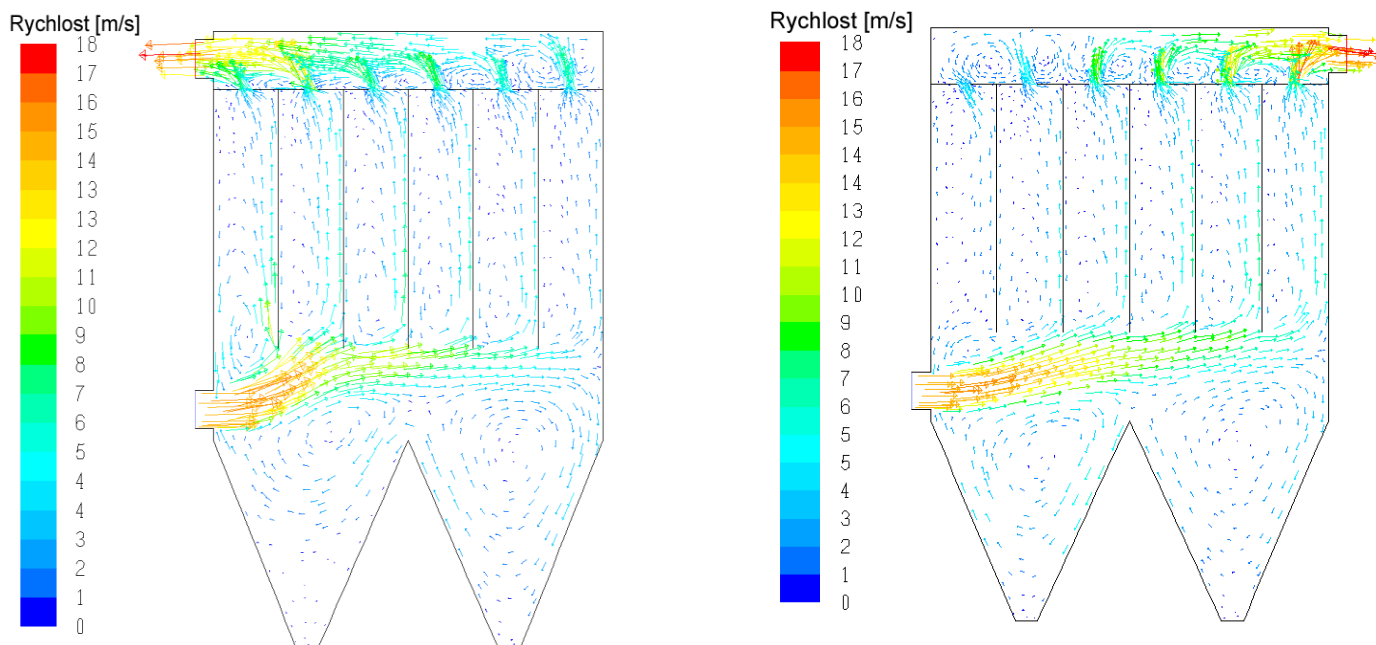
### 4. Výsledky simulačních výpočtů

Řešení CFD modelu poskytne rozložení rychlostí a tlaků ve filtru, ze kterých se vyhodnotí hmotnostní průtoky komorami  $\dot{m}_{k,j}$ , [ $j = 1, 2, \dots, 6$ ]. Kvantitativním ukazatelem nerovnoměrnosti rozdělení plynu mezi komory je variační součinitel  $\delta$  hmotnostních průtoků komorami, tj. podíl výběrové směrodatné odchylky a střední hodnoty hmotnostních průtoků komorami.

Na všech následujících obrázcích je znázorněno proudění filtrem jako pole šípek udávajících směr proudění, množství šípek je úměrné lokální hustotě toku a barva absolutní hodnotě rychlosti.

#### 4.1. Vliv vzájemné polohy hrdel

Následující obrázek 3 a tabulka 1 srovnává rozdělení plynu mezi komorami podle toho, zda je výstupní hrdlo na druhé či na stejné straně filtru jako hrdlo vstupní.



Obr. 3 Vliv orientace výstupního hrdla

Tabulka 1 Vliv orientace výstupního hrdla

Vstupní hrdlo	vlevo	vlevo
Výstupní hrdlo	vlevo	vpravo
Průřez výstupu komor [m <sup>2</sup> ]	0,2	0,2
Rychlost ve vstupním hrdle [m/s]	15	15
Střední průtok komorami [kg/s]	3,06	3,06
Směrodatná odchylka průtoků [kg/s]	0,74	2,59
<b>Variační součinitel průtoků [-]</b>	<b>0,24</b>	<b>0,85</b>

V obou uspořádáních jsou preferovány komory blíže k výstupnímu hrdlu filtru. Filtr se vstupem i výstupem na stejné straně má rovnoměrnější rozdělení průtoků mezi komorami, jak je vidět i z nižší hodnoty variačního součinitele. U filtru s výstupem na druhé straně od vstupu dochází ještě k recirkulaci plynu ve výsypkách.

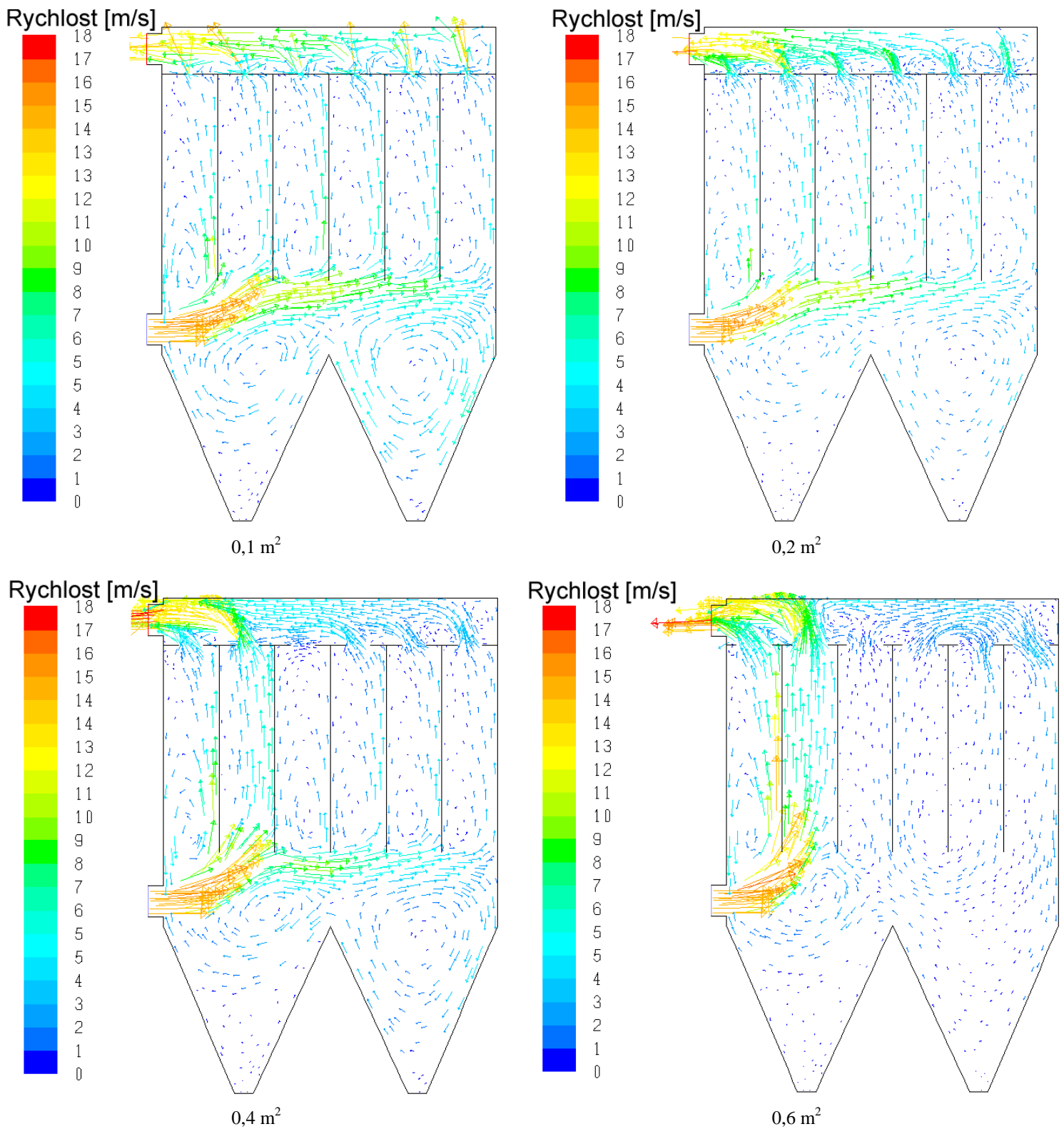
#### 4.2. Vliv odporu komor

Následující obrázek 4 a tabulka 2 srovnává rozdělení plynu mezi komorami podle odporu komor, tj. v modelu podle velikosti výstupních otvorů komor.

Na obrázku 4 a v tab. 2 je patrné, že s rostoucím odporem komor se vyrovnávají průtoky komorami, ale jako další efekt se objevuje cirkulace plynu ve výsypkách, což může mít vliv na uložení částic v nich.

Tabulka 2 Vliv odporu komor

Průřez výstupu komor [m <sup>2</sup> ]	0,1	0,2	0,4	0,6
Rychlost ve vstupním hrdle [m/s]	15	15	15	15
Celkový průtok [kg/s]	18,37	18,38	18,37	18,38
Střední průtok komorami [kg/s]	3,06	3,06	3,06	3,06
Směrodatná odchylka průtoků [kg/s]	0,24	0,74	2,68	5,64
<b>Variační součinitel průtoků [-]</b>	<b>0,08</b>	<b>0,24</b>	<b>0,88</b>	<b>1,84</b>

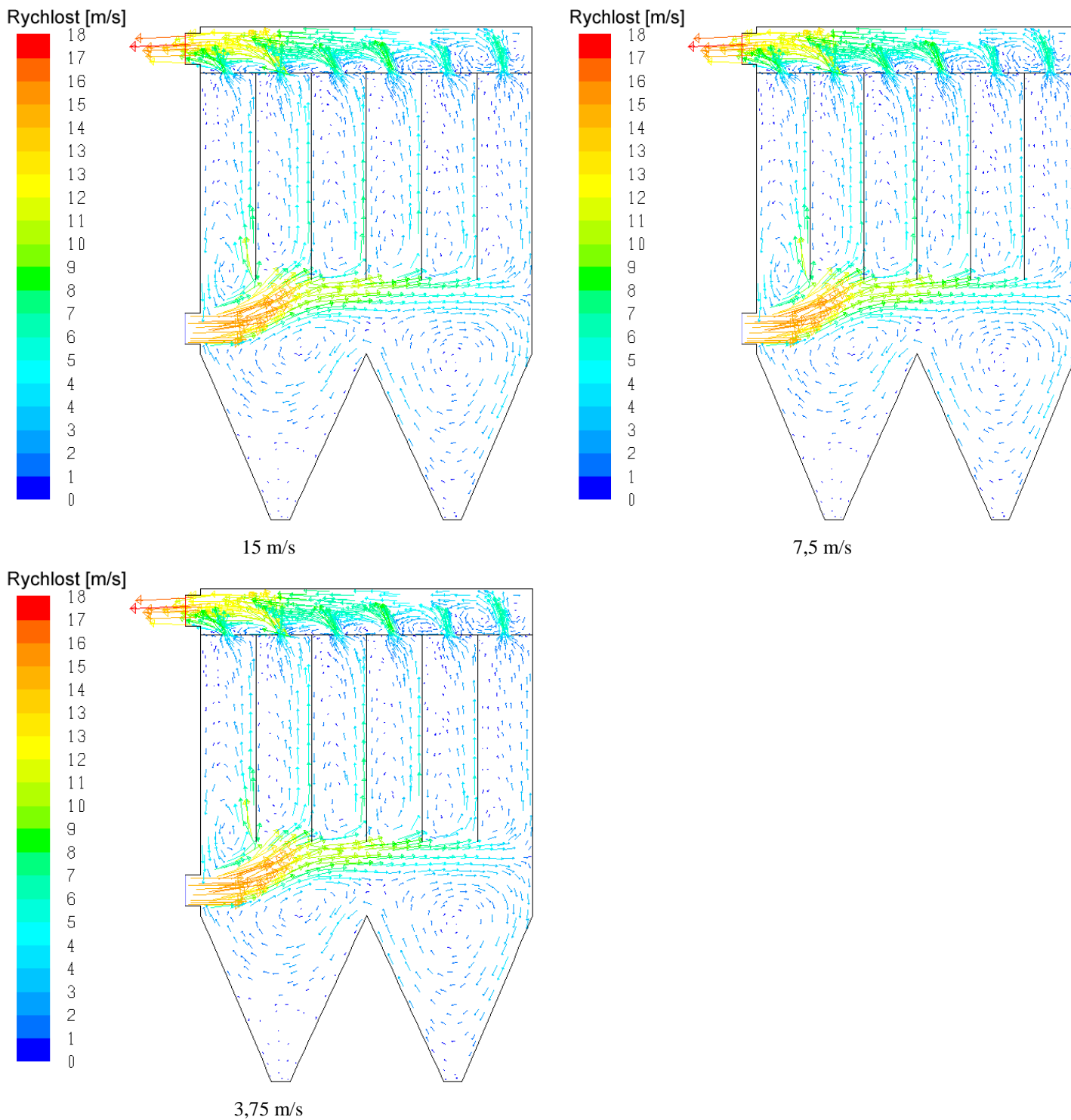


Obr. 4 Vliv odporu komor (průřezy otvorů 0,1; 0,2; 0,4; 0,6 m<sup>2</sup>)

**4.3. Vliv průtoku**

Následující obrázek 4 a tabulka 3 srovnává rozdělení plynu mezi komorami v závislosti na celkovém

průtoku, který se obdobně jako např. v případě čištění spalin mění v běžném regulačním rozsahu topeniště 1:4.



**Obr. 5** Vliv průtoku - vstupní rychlost do filtru 15; 7,5; 3,75 m/s

Z obrázku 5 i tabulky 3 je patrné, že rozdělení průtoků mezi komory není zatížením filtru ovlivněno. Pro všechny modelované průtoky zůstal variační součinitel konstantní.

**Tabulka 3** Vliv průtoku na rovnoměrnost rozdělení plynu

Průřez výstupu komor [m <sup>2</sup> ]	0,2	0,2	0,2
<b>Rychlost ve vstupním hrdle [m/s]</b>	<b>15</b>	<b>7,5</b>	<b>3,75</b>
Celkový průtok [kg/s]	18,38	9,19	4,59
Střední průtok komorami [kg/s]	3,06	1,53	0,77
Směrodatná odchylka průtoků [kg/s]	0,74	0,38	0,19
<b>Variační součinitel průtoků [-]</b>	<b>0,24</b>	<b>0,25</b>	<b>0,25</b>

## 5. Závěr

Prezentovaná jednoduchá metoda umožňuje rychlé posouzení funkce tkaninového filtru před jeho podrobným návrhem. Další vývoj metody vede jednak k posuzování návrhů vestavěb do filtru z hlediska vlivu na distribuci plynu a jednak na dynamické modelování pracovního cyklu filtru pomocí posloupnosti kvazistacionárních stavů, mezi nimiž se zvětšování odporu vrstvy částic na filtrační tkanině modeluje jako odpovídající zmenšování průřezů výstupů komor.

## Poděkování

Řešení této problematiky bylo realizováno za finanční podpory vyčleněné z prostředků výzkumného záměru MSM 6046137304 řešeného na Fakultě technologie ochrany prostředí VŠCHT Praha.

## Seznam symbolů

$f$	vliv tíhových sil [-]
$i, j, k, p$	dolní indexy
$k$	rychlost tvorby turbulentní energie [ $\text{m}^2\text{s}^{-2}$ ]
$\dot{m}$	hmotnostní tok [ $\text{kg}\text{s}^{-1}$ ]
$p$	tlak [ $\text{Nm}^{-2}$ ]
$\Delta p$	tlaková ztráta [Pa]
$t$	čas [s]
$v$	vektor rychlosti [ $\text{ms}^{-1}$ ]
$\dot{V}$	objemový tok [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]
$S$	průřez [ $\text{m}^2$ ]
$\delta$	variační součinitel [-]
$\varepsilon$	rychlost disipace [ $\text{m}^2\text{s}^{-3}$ ]
$\rho$	hustota [ $\text{kg}\text{m}^{-3}$ ]
$\tau$	tenzor Reynoldsových napětí [ $\text{Nm}^{-2}$ ]

## Literatura

1. Příhoda, J.; Louda, P. *Matematické modelování turbulentního proudění*; ČVUT: Praha, 2007.
2. Fořt, J.; et al. *Numerické metody řešení problémů proudění III*; ČVUT: Praha, 2004
3. Rocha, S. M. S.; et al. *Fluid Dynamics Study of the Influence of the Position of the Feed in Fabric Filters*, 10th International Symposium on Process Systems Engineering, 2009.

## Summary

Tomáš Hlinčík, Václav Koza  
Institute of Chemical Technology, Prague

### *The Gas Distribution in the Bag Filters With Non-standard Layout of Gas Ports*

The performance of the bag filters depends on the layout of gas ports as well as on other factors. The article presents the method for the evaluation of these influences based on CFD. The advantage of presented method is in the simplified representation of the filter internals without distorting the results regarding the filter as a whole. The model is used to analyze the influence of ports mutual position, the hydraulic resistance of filter sections and of the total gas flow.