

Beata Śładkowska-Rybka¹, Marian Sarna¹

REDUKCJA GABARYTÓW ELEKTROFILTRU DZIĘKI MODYFIKACJI PRZEPŁYWU SPALIN

Streszczenie. Elektrofiltry są jednymi z najskuteczniejszych urządzeń odpylających, umożliwiając zatrzymanie nawet ponad 99,9% ziaren pyłu zawartych w odpylanym gazie. Skuteczność usuwania pyłu w elektrofiltrze zależna jest od całego szeregu czynników, począwszy od parametrów konstrukcyjnych i elektrycznych odpylacza, poprzez właściwości fizyko-chemiczne oczyszczanego gazu, po szeroko pojęte właściwości samych ziaren pyłu. Istotne znaczenie ma także prędkość oraz sposób przepływu spalin wewnątrz elektrofiltru. Dzięki odpowiedniemu ukształtowaniu pola prędkości przepływu gazu w komorze odpylacza możliwa jest intensyfikacja pracy urządzenia, co potwierdzone zostało w licznych doniesieniach literaturowych dotyczących technologii skośnych przepływów gazu SGFT (Skewed Gas Flow Technology). W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych, prowadzonych w oparciu o własne programy obliczeniowe, nad możliwością zmniejszenia gabarytów elektrofiltru (zmniejszenie długości elektrod zbiorczych) dzięki zastosowaniu w urządzeniu technologii skośnych przepływów gazu.

Słowa kluczowe: elektrofiltr, skuteczność odpylania, technologia skośnych przepływów spalin, badania symulacyjne.

WSTĘP

Jednym z istotnych czynników wpływających na pracę elektrofiltru jest uformowanie przepływu spalin w komorze odpylacza. Sposób przepływu gazu w elektrofiltrze determinuje osadzanie się cząstek pyłu na elektrodach zbiorczych. Lokalnie występujące zwiększone wartości prędkości spalin skutkują redispersją warstwy osadzonej już na elektrodach zbiorczych. Wszelkie zakłócenia przepływu w postaci miejscowych zawirowań czy pulsacji również sprzyjają zjawisku wtórnego porywania zebranego już pyłu czy jego unoszeniu z lejów zbiorczych, co w skrajnych przypadkach może znacząco obniżyć skuteczność odpylania [12, 16]. Ukształtowanie pola prędkości spalin może także wpływać na rozkład ładunku przestrzennego w obszarze międzyelektrodowym. Jak podaje Lind [9], w przypadku odpylania pyłu o dużej rezystywności, nierównomierny rozkład prędkości spalin powoduje jonizację wsteczną oraz

¹ Zakład Ochrony Powietrza, Instytut Ochrony i Inżynierii Środowiska, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, 43-309 Bielsko-Biała, ul. Willowa 2, e-mail: bsladkowska@ath.bielsko.pl

liczne przebicia przestrzeni międzyelektrodowej, co redukuje skuteczność odpylania na skutek obniżenia natężenia pola elektrycznego oraz średniego prądu ulotu, a także wtórnego porywania pyłu.

Zapyłony gaz z procesu technologicznego transportowany jest kanałami, przy czym średnia prędkość przepływu w kanałach powinna zapobiegać wytrącaniu się pyłu. W zależności od składu ziarnowego, gęstości pyłu, jego stężenia, ale także od długości i kształtu samych kanałów, prędkość ta waha się w granicach $13\text{-}20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [12].

Za kanałem doprowadzającym, a przed komorą odpylacza niezbędne jest zmniejszenie prędkości gazu oraz rozprawienie spalin w całym przekroju poprzecznym komory. Wymaga to obecności dyfuzora, w którym energia kinetyczna spalin zamieniona zostaje na energię potencjalną w postaci wzrostu ciśnienia w urządzeniu [12, 13]. W praktyce stosowane są dyfuzory z systemem płaskich lub przestrzennych sit dławiających o różnych stopniach otwarcia oraz elementami kierującymi w postaci łopatek lub palisad łopatek, montowanych również w razie potrzeby, w kanałach doprowadzających. Sita różnią się konstrukcyjnie – mogą być wykonane w formie rynienek, płyt perforowanych bądź systemu żaluzji o ustalonym lub regulowanym stopniu otwarcia. Brak tych elementów sprawia, że strumień spalin wewnątrz komory przepływa jedynie małym przekrojem [7, 6, 14].

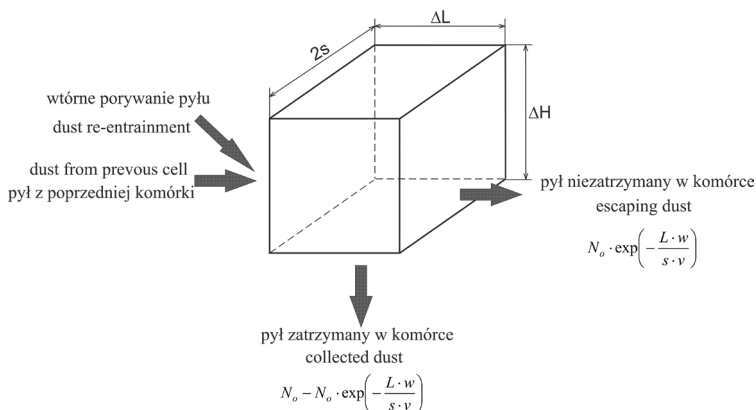
Dobór odpowiednich elementów dławiająco-kierujących jest sprawą skomplikowaną, wymagającą przeprowadzenia odpowiednich badań modelowych z wykorzystaniem modelowania analogowego [5, 13]. W latach osiemdziesiątych XX wieku, wraz z postępowaniem technik komputerowych, rozwinęło się modelowanie przepływów gazu w elektrofiltrze metodami numerycznymi [3, 8, 11].

Zastosowanie w modelowaniu przepływów w elektrofiltrze techniki CFD (Computer Fluid Dynamics) zaowocowało identyfikacją nierównomiernie ukształtowanych pól prędkości spalin, pozwalających na poprawę skuteczności odpylania w elektrofiltrze. Te nierównomierne profile prędkości nazwano „skośnymi”, a technologię ich zastosowania – SGFT (Skew Gas Flow Technology). Technologia SGFT zastosowana została w rzeczywistych obiektach, przynosząc realną poprawę skuteczności odpylania wyrażoną zmniejszeniem stężenia pyłu za elektrofiltrem nawet o 20-80% [1, 2, 4, 10].

METODYKA BADAŃ

W pracy przedstawiono wyniki analizy symulacyjnej wpływu ukształtowania przepływu spalin w komorze elektrofiltru na możliwość redukcji gabarytów odpylacza (zmniejszenia długości elektrod zbiorczych). Obliczenia przeprowadzono przy użyciu pakietu własnych programów komputerowych pracujących w środowisku Mathcad®. Umożliwiają one między innymi obliczanie skuteczności odpylania w elektrofiltrze czy analizę zmian w rozkładzie stężeń pyłu w urządzeniu.

W obliczeniach przyjęto dyskretny model komory elektrofiltru. Każdą ze ścieżek odpylania, ograniczoną elektrodami zbiorczymi, podzielono na szereg rozłącznych



Rys. 1. Schemat pojedynczej komórki obliczeniowej w modelu
Fig. 1. Diagram of a single cell in the computational model

komórek (rys. 1). Pył trafiający do pojedynczej komórki obliczeniowej pochodzi z dwóch źródeł: z wylotu komórki poprzedniej (pył, który nie został tam zatrzymany) oraz z wtórnego porywania z komórki z poprzedniego rzędu, położonej wyżej. Założono, że proces wtórnego porywania zachodzi z jednakową intensywnością w całej komórce elektrofiltru i uwzględniany jest w modelu za pomocą współczynnika κ . Obliczenia prowadzono dla strefy odpylacza składającej się z 10 niezależnych ścieżek odpylania podzielonych na 10x15 komórek obliczeniowych.

W tabeli 1 zestawiono wartości parametrów przyjęte do obliczeń.

Tabela 1. Parametry procesu odpylania w elektrofiltrze oraz ich wartości przyjęte w obliczeniach
Table 1. Process parameters of electrostatic dust collection and their values adopted in the calculation

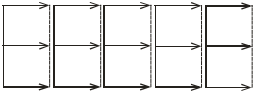
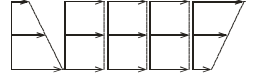
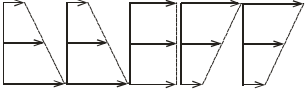
Parametr Factor	Oznaczenie Symbol	Wartość parametru Factor value
liczba stref elektrofiltru number of zones in the ESP	-	5
długość pojedynczej strefy zone length	L	4 m
długość kroku obliczeniowego w strefie iteration step length	l	0,4 m
podziałka międzyelektrodowa plate-to-plate distance	2×s	0,4 m
stężenia pyłu na wlocie do elektrofiltru inlet dust concentration	S_p	26 g×m ⁻³
średnia prędkość przepływu spalin mean value of gas velocity	v_{sr}	1 m×s ⁻¹
współczynnik wtórnego porywania pyłu dust re-entrainment factor	κ	0,00
prędkość wędrowania ziarna pyłu dust particle velocity	w	0,115 m×s ⁻¹

Kształtowanie przepływu gazu w przyjętym modelu elektrofiltru możliwe jest poprzez zadawanie w każdym kroku obliczeniowym pola prędkości gazu w przekroju poprzecznym komory odpylacza. Generowanie odpowiednich pól prędkości spalin prowadzone jest w oddzielnych modułach.

W obliczeniach uwzględniono trzy sposoby przepływu gazu w elektrofiltrze: przepływ równomierny w każdej ze stref (typ 1) oraz dwa odmienne typy nierównomiernych przepływów liniowo-skośnych (typ 2 i typ 3), które przedstawiono schematycznie w tabeli 2 wraz z przyjętymi do obliczeń wartościami współczynnika q , będącego miarą skośności przepływu gazu.

Tabela 2. Przepływy gazu zastosowane w analizowanym elektrofiltrze

Table 2. Gas flow types applied in the electrostatic precipitator

Typ przepływu Gas flow type		Współczynnik skośności przepływu gazu q Coefficient of gas flow skewness q				
		strefa I zone I	strefa II zone II	strefa III zone III	strefa IV zone IV	strefa V zone V
typ 1 type 1		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
typ 2 type 2		-1,0	0,0	0,0	0,0	1,0
typ 3 type 3		-1,0	-1,0	0,0	1,0	1,0

WYNIKI I DYSKUSJA

Dla analizowanego elektrofiltru, zakładając różne typy przepływu gazu w komorze, obliczono skuteczność odpylania oraz stężenie pyłu w każdym kroku obliczeniowym. Wartości te uzyskane w ostatniej (piątej) strefie urządzenia zestawiono w tabelach 3 i 4.

Analiza danych zawartych w tabeli 3 nie pozwala na stwierdzenie istotnych różnic w obliczonej skuteczności odpylania pomiędzy uwzględnianymi w obliczeniach przepływami gazu w komorze elektrofiltru. Jednak wyznaczenie na podstawie skuteczności odpylania stężenia pyłu pozwala na zobrazowanie wpływu sposobu ukształtowania przepływu gazu na pracę elektrofiltru.

Jak wynika z danych zamieszczonych w tabeli 4 najwyższą wartość stężenia pyłu na wylocie z elektrofiltru (w ostatnim kroku) obliczono dla urządzenia o równomiernym przepływie gazu w każdej ze stref (typ 1) i wynosi ona $0,260 \text{ mg} \times \text{m}^{-3}$. Zastosowanie w odpylaczu nierównomiernego przepływu spalin pozwala na znaczne obniżenie tej wartości do $0,156 \text{ mg} \times \text{m}^{-3}$ dla liniowo-skośnego przepływu typu 2 oraz do $0,130 \text{ mg} \times \text{m}^{-3}$ dla liniowo-skośnego przepływu

Tabela 3. Skuteczność odpylania w kolejnych krokach obliczeniowych ostatniej strefy elektrofiltru dla analizowanych typów przepływu gazu w komorze
Table 3. De-dusting efficiency in the last zone of electrostatic precipitator for analyzed gas flow types in the ESP chamber

Krok obliczeniowy Iteration step	Typ przepływu Gas flow type		
	typ 1 type 1	typ 2 type 2	typ 3 type 3
	Skuteczność odpylania (%) De-dusting efficiency (%)		
1	99,9920	99,9923	99,9950
2	99,9936	99,9943	99,9962
3	99,9949	99,9958	99,9971
4	99,9960	99,9968	99,9978
5	99,9968	99,9976	99,9983
6	99,9975	99,9982	99,9987
7	99,9980	99,9986	99,9990
8	99,9984	99,9989	99,9992
9	99,9987	99,9992	99,9994
10 (wylot)	99,9990	99,9994	99,9995

Tabela 4. Stężenie pyłu w kolejnych krokach obliczeniowych ostatniej strefy elektrofiltru dla analizowanych typów przepływu gazu w komorze
Table 4. Dust concentration in the last zone of electrostatic precipitator for analyzed gas flow types in the ESP chamber

Krok obliczeniowy Iteration step	Typ przepływu Gas flow type		
	typ 1 type 1	typ 2 type 2	typ 3 type 3
	Stężenie pyłu ($\text{mg}\times\text{m}^{-3}$) Dust concentration ($\text{mg}\times\text{m}^{-3}$)		
1	2,080	2,002	1,300
2	1,664	1,482	0,988
3	1,326	1,092	0,754
4	1,040	0,832	0,572
5	0,832	0,624	0,442
6	0,650	0,468	0,338
7	0,520	0,364	0,260
8	0,416	0,286	0,208
9	0,338	0,208	0,156
10 (wylot)	0,260	0,156	0,130

typu 3. Ważne są także wartości stężenia pyłu w kilku poprzednich krokach obliczeniowych. Porównując bowiem stężenie pyłu na wylocie z elektrofiltru o przepływie równomiernym (typ 1) z wartościami obliczonymi dla przepływów liniowo-skośnych można stwierdzić, że przepływ typu 2 pozwala osiągnąć niższą wartość stężenia po 9 kroku, a przepływ typu 3 takie samo stężenie już po 7 kroku obliczeniowym. Oznacza

to że elektrofiltr o przepływnie liniowo-skośnym osiągnie zbliżoną skuteczność odpylania jak pełnowymiarowe urządzenie o przepływie równomiernym (typ 1), nawet jeśli ostatnią strefę skrócimy do 3,6 m (dla przepływu typu 2) oraz do 2,8 m (dla przepływu typu 3). Dzięki zastosowaniu nierównomiernego, odpowiednio ukształtowanego przepływu gazu możliwe jest więc zmniejszenie gabarytów elektrofiltru poprzez skrócenie ostatniej strefy odpylania.

WNIOSKI

Jednym ze sposobów na poprawę skuteczności odpylania w elektrofiltrze jest odpowiednie ukształtowanie przepływu gazu wewnątrz komory urządzenia. Jak pokazują przedstawione powyżej wyniki symulacji komputerowych ten wzrost skuteczności odpylania dzięki zastosowaniu technologii skośnych przepływów gazu SGFT można wykorzystać na zmniejszenie długości elektrod zbiorczych (a co za tym idzie ich powierzchni), co niewątpliwie wpłynie na obniżenie kosztów budowy elektrofiltru.

PIŚMIENNICTWO

1. Boyd M.: Skewed Gas Flow Technology offers antidote to opacity derates, *Power Engineering*, vol. 105(6), 2001.
2. Gibson D., Schmitz W., Hein A.G. Electrostatic precipitator skew gas flow technology application and quantification, W: materiały konferencyjne VII ICESP, Kyongju, South Korea 1998.
3. Haque S.M.E., Rasul M.G., Deev A., Khan M.M.K., Subaschandar N.: Flow simulation in an electrostatic precipitator of a thermal power plant, *Applied thermal Engineering*, vol. 29, 2009.
4. Hein A.G., Gibson D.: Skewed gas flow technology improves precipitator performance, ESCOM experience in South Africa, W: materiały konferencyjne VI ICESP, Budapest, Hungary 1996.
5. Jędrusik M.: Elektrofiltry. Rozwinięcie wybranych technik podwyższania skuteczności odpylania, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
6. Jędrusik M., Nowaczewski E.: Dobór elementów rozdziału gazu dla modelu elektrofiltru poziomego, *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej Filii w Bielsku-Białej, Inżynieria Włókiennicza i Ochrona Środowiska* nr 21, 1994.
7. Juda J., Nowicki M.: Urządzenia odpylające, PWN Warszawa 1986.
8. Kołodziejczyk K.: Symulacje numeryczne rozkładu prędkości w elektrofiltrze z wykorzystaniem pakietu FLUENT, *Zagadnienia urządzeń ochrony środowiska, Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie*, vol. 32, 2006.
9. Lind L.: Influence of gas distribution on precipitator performance, W: materiały konferencyjne 6th Joint EPA Symposium on Transfer and Utilization of Particulate Control Technology, New Orleans, USA 1986.

10. Lockhart J., Weiss O.: The Application of Skewed Gas Flow Technology at the Israel Electric Corp. MD-A Station, W: materiały konferencyjne VIII ICESP, Birmingham, USA 2001.
11. Nielsen N. F., Lind L.: CFD simulation of gas flow and particle movement in ESPs, W: materiały konferencyjne IX ICESP, Mpumalanga, South Africa 2004.
12. Parker K.R.: Electrical operation of electrostatic precipitators, Institution of Electrical Engineers, London 2003.
13. Parker K.R.: Applied electrostatic precipitation, Blackie Academic & Professional, London 1997.
14. Sarna M.: Wybrane zagadnienia elektrostatycznego odpylania gazów przemysłowych, Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała 2005.
15. Schmitz W., Gibson D., Pretorius L.: Computational fluid dynamics modeling of collection dynamics, W: materiały konferencyjne VIII ICESP, Birmingham, USA 2001.
16. White H.J.: Industrial electrostatic precipitation, Addison-Wesley Publishing Company, 1963.

SIZE REDUCTION OF ELECTROSTATIC PRECIPITATOR CHAMBER BY MODIFICATION OF GAS FLOW DISTRIBUTION

Abstract

Electrostatic precipitators (ESP) are one of the most effective devices for particulate emission control, removing from the exhaust gases even 99,9 % of dust particles. The collection efficiency of the ESP depends on a number of factors: mechanical design and electrical operating parameters, physical and chemical properties of cleaned gas, characteristic of dust particles suspended in the gas. Among the most important factors affecting the ESP effectiveness, the velocity and the distribution of gas flow in the ESP chamber should be also indicated. Significant increase in ESP efficiency is possible thanks to the application of Skewed Gas Flow Technology (SGFT). In this paper the computer simulations results are shown. Authors investigated the possibility of ESP chamber size reduction by modification of gas flow distribution.

Key words: electrostatic precipitator (ESP), de-dusting efficiency, Skewed Gas Flow Technology, computer simulations.