

BEATA SŁADKOWSKA-RYBKA, MARIAN SARNA

Institut Ochrony i Inżynierii Środowiska
Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

MOŻLIWOŚĆ POPRAWY SKUTECZNOŚCI ODPYLANIA W ELEKTROFILTRZE DZIĘKI NIERÓWNOMIERNEMU PRZEPIYWOWI SPALIN

Streszczenie. Skuteczność odpylania w elektrofiltrze zależy od szeregu czynników: począwszy od parametrów konstrukcyjnych urządzenia, poprzez parametry elektryczne, właściwości odpylanego gazu, po właściwości pyłu zatrzymywanego w urządzeniu. Jednak najważniejszym z punktu widzenia prezentowanej pracy parametrem jest odpowiedni rozkład strumienia spalin w przekroju poprzecznym komory odpylacza. Wpływ konfiguracji pola prędkości gazu na skuteczność elektrofiltru jest znany i badany od lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku. Wyjaśnienie, jakie rodzaje pól prędkości na wlocie i wylocie elektrofiltru prowadzą do zmniejszenia stężenia zapylenia, było przedmiotem licznych badań teoretycznych i doświadczalnych. W prezentowanej pracy przedstawiono wyniki własnych badań symulacyjnych nad wpływem sposobu ukształtowania pola prędkości spalin w komorze elektrofiltru na skuteczność odpylania.

Słowa kluczowe: elektrofiltr, skuteczność odpylania, nierównomierny przepływ spalin, badania symulacyjne

Wstęp

Jednym z wielu czynników wpływających na pracę elektrofiltru jest odpowiednie uformowanie przepływu spalin w komorze odpylacza. Jak podaje WHITE (1963), jego wpływ na skuteczność pracy elektrofiltru jest porównywalny z efektem wyładowania ulotowego czy oddziaływaniem pola elektrycznego na ziarno. Sposób przepływu aerozolu w elektrofiltrze determinuje osadzanie się cząstek pyłu na elektrodach zbiorczych. Wszelkie zakłócenia przepływu w postaci lokalnych zawirowań czy pulsacji sprzyjają zjawisku wtórnego porywania zebranego już pyłu czy jego wymiataniu z lejów zbiorczych, co w skrajnych przypadkach może zmniejszyć skuteczność odpylania w sposób drastyczny. Pomimo świadomości ogromnego znaczenia kształtowania przepływu spalin, badania naukowe nad tym zagadnieniem rozpoczęły się wiele lat po pierwszym

zastosowaniu elektrofiltrów w przemyśle. Początkowo skupiono się jedynie na zapewnieniu równomiernego przepływu spalin (poła prędkości) w przekroju poprzecznym elektrofiltru (WHITE 1963).

Zapylony gaz z procesu technologicznego jest transportowany 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 samych kanałów, prędkość ta zawiera się w granicach $13\text{--}20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (PARKER 1997). Jako że optymalna prędkość gazu w elektrofiltrze wynosi około $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, niezbędne jest jej zmniejszenie za kanałem doprowadzającym, a przed komorą odpylacza. Wymaga to obecności dyfuzora, w którym energia kinetyczna spalin trafiających z dużą prędkością z kanału wlotowego zostaje zamieniona na energię potencjalną w postaci wzrostu ciśnienia spalin w urządzeniu (PARKER 1997, 2003). W praktyce stosowane są dyfuzory z systemem sit i elementów kierujących, montowanych również w razie potrzeby w kanałach doprowadzających. Stosuje się systemy łopatek hamujących, instalowanych w dyfuzorze bądź na wejściu do komory, czy układy płaskich lub przestrzennych sit dławiących umożliwiających samoregulację prędkości gazu (JUDA i NOWICKI 1986). Stosowane mogą być układy sit o różnych stopniach otwarcia (SARNA 2005). Obecność sit, obok ich działania dławiącego, bardzo efektywnie rozprowadza strugę gazu w całym przekroju poprzecznym elektrofiltru. Brak tych elementów sprawia, że strumień spalin wewnątrz komory przepływa jedynie małym przekrojem.

Na przestrzeni lat problematyka odpowiedniego ukształtowania przepływu spalin w przekroju poprzecznym komory oraz jego wpływu na pracę elektrofiltru była podejmowana wielokrotnie, jednak skupiano się jedynie na zapewnieniu idealnie wyrównanego przepływu spalin jako klucza zapewniającego optymalną pracę urządzenia (LUTYŃSKI 1965, WHITE 1963).

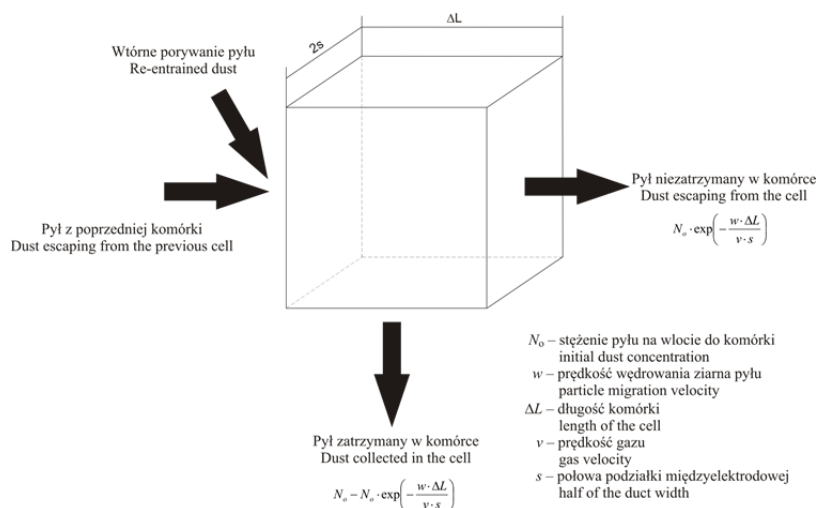
W latach osiemdziesiątych XX wieku, wraz z postępem technik komputerowych, rozwinęło się modelowanie przepływów gazu w elektrofiltrze metodami numerycznymi. Zastosowanie w tym celu techniki CFD (*Computer Fluid Dynamics*) zaowocowało identyfikacją nierównomiernie ukształtowanych profili prędkości, pozwalających na poprawę skuteczności odpylania w elektrofiltrze. Te nierównomierne profile prędkości nazwano „skośnymi”, a technologię ich zastosowania – SGFT (*Skew Gas Flow Technology*). Wkrótce ten sposób ukształtowania pola prędkości spalin w elektrofiltrze został zastosowany w rzeczywistych obiektach, przynosząc realną poprawę skuteczności odpylania, wyrażoną zmniejszeniem stężenia pyłu za elektrofiltrem nawet o 20–80% (HEIN i GIBSON 1996 a, 1996 b, GIBSON i IN. 1998, BOYD 2001 a, 2001 b, LOCKHART i WEISS 2001, SCHMITZ i IN. 2001).

Materiały i metody

W pracy podjęto analizę symulacyjną wpływu modyfikacji przepływu spalin na wlocie do elektrofiltru na skuteczność odpylania. Badania prowadzono, wykorzystując pakiet własnych programów komputerowych pracujących w środowisku Mathcad[®]. Na potrzeby obliczeń stworzono dyskretny model komory elektrofiltru. Każdą ze ścieżek odpylania, ograniczoną elektrodami zbiorczymi, podzielono na szereg rozłącznych

komórek. Do ilościowego opisu procesu odpylania w komórkach posłużono się modelem DEUTSCHA (1922), z uwzględnieniem wszystkich jego założeń i uproszczeń.

Pył trafiający do pojedynczej komórki 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 komorze elektrofiltru. Przyjęto współczynnik wtórnego porywania $\kappa = 0,08$. Obliczenia prowadzono dla strefy odpylacza składającej się z 10 niezależnych od siebie ścieżek odpylania o szerokości podziałki międzyelektrodowej $2s = 395$ mm. Każdą ze ścieżek odpylania podzielono na 10×15 komórek obliczeniowych. Schemat pojedynczej komórki obliczeniowej przedstawiono na rysunku 1.

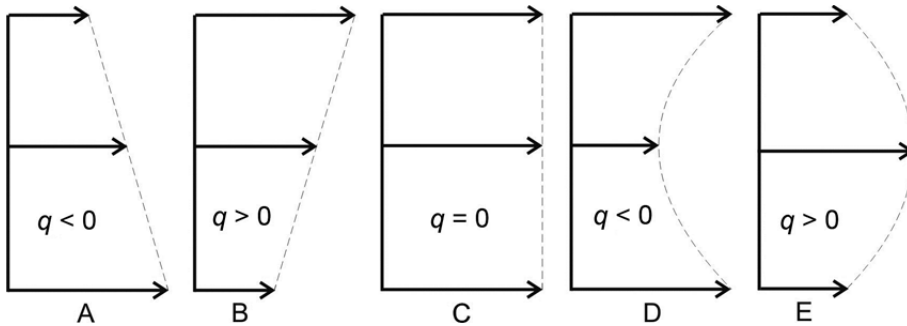


Rys. 1. Schemat pojedynczej komórki obliczeniowej w modelu

Fig. 1. Diagram of a single cell in the computational model

W obliczeniach przyjęto wartość parametru $w = 0,087 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Założono, że stężenie monodispersyjnego pyłu w przekroju wlotowym komory odpylacza jest jednorodne i wynosi $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$. Badano skuteczność elektrofiltru o czterech i pięciu strefach odpylania, o długości pojedynczej strefy $L = 4$ m.

W badaniach uwzględniano trzy kombinacje profili prędkości, przedstawione na rysunku 2 – liniowo-skośną (A-C-C-B i A-C-C-C-B), wklęsło-wypukłą (D-C-C-E i D-C-C-C-E) oraz równomierną (C-C-C-C i C-C-C-C-C), będącą bazą do dokonania porównań. Dla wszystkich „skośnych” kombinacji profili prędkości przyjęto średnią prędkość przepływu spalin w zakresie $0,8\text{-}1,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, natomiast dla przepływu równomiernego – w zakresie $0,85\text{-}1,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Miarą nierównomierności („skośności”) przepływu jest bezwymiarowy współczynnik skośności q , którego wartość bezwzględna przyjęto w zakresie od 0,8 do 1,4. Profile prędkości A i B tzw. profile liniowo-skośne, D – profil nazywany wklęsłym, E – wypukłym. Profil C odpowiada równomiernemu, standardowemu przepływowi gazu.



Rys. 2. Profile prędkości gazu stosowane w obliczeniach
 Fig. 2. Velocity profiles of gas used in the calculations

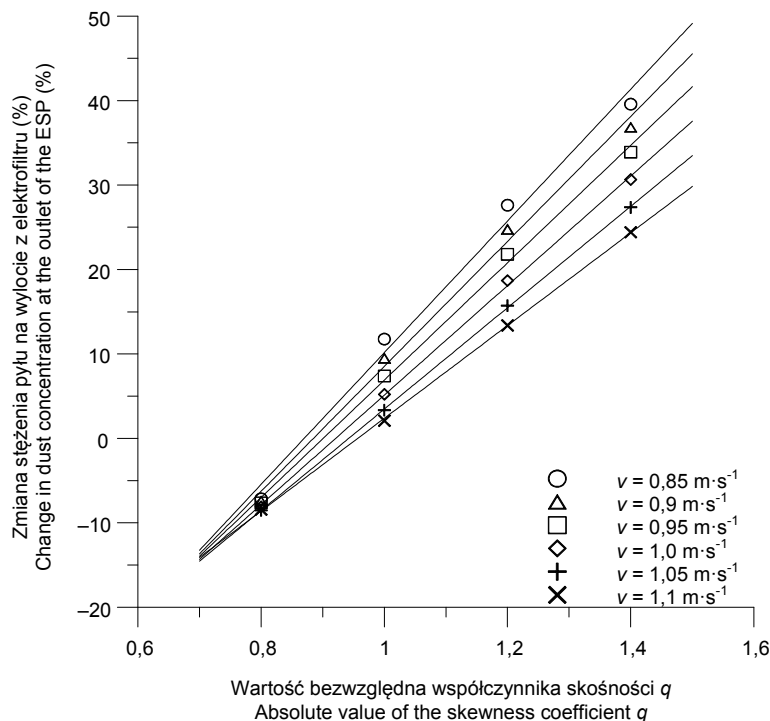
Dla elektrofiltru o czterech i pięciu strefach odpylania obliczono stężenie zapylenia na wylocie z urządzenia dla obu analizowanych skośnych kombinacji pól prędkości, uwzględniając różne wartości v_{sr} i współczynnika skośności q . Obliczono także stężenie zapylenia za urządzeniem w sytuacji, gdy przepływ spalin jest równomierny w każdej ze stref ($q = 0$). Wyniki uzyskane dla urządzenia o przepływie skośnym porównano ze stężeniem pyłu obliczonym dla elektrofiltru o takiej samej liczbie stref, w którym gaz przepływał równomiernie w każdej z nich, lecz ze średnią prędkością o $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ mniejszą. Pozwala to stwierdzić, w jakim stopniu wprowadzenie niestandardowego przepływu spalin może zrekompensować zmniejszenie skuteczności odpylania spowodowane wzrostem prędkości przepływu spalin.

Wyniki

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono zmianę stężenia pyłu na wylocie z odpylacza w funkcji współczynnika skośności q w elektrofiltrze o czterech i pięciu strefach dla liniowo-skośnej kombinacji przepływów typu A-C-B, wyznaczoną w odniesieniu do elektrofiltru o równomiernym przepływie gazu z prędkością średnią o $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ mniejszą. Z kolei na rysunkach 5 i 6 przedstawiono zmianę stężenia pyłu na wylocie z odpylacza w funkcji współczynnika skośności q w elektrofiltrze o czterech i pięciu strefach dla wklęsło-wypukłej kombinacji przepływów typu D-C-E, obliczoną w odniesieniu do elektrofiltru o równomiernym przepływie gazu z prędkością średnią o $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ mniejszą.

Dyskusja

Jak wynika z danych zaprezentowanych na rysunkach 3-6, zmiany w stężeniu pyłu na wylocie z urządzenia w odniesieniu do elektrofiltru bazowego o mniejszej średniej prędkości spalin zawierają się w szerokich granicach, świadcząc zarówno o pogorszeniu, jak i poprawie pracy odpylacza. Dla liniowo-skośnej kombinacji pól prędkości

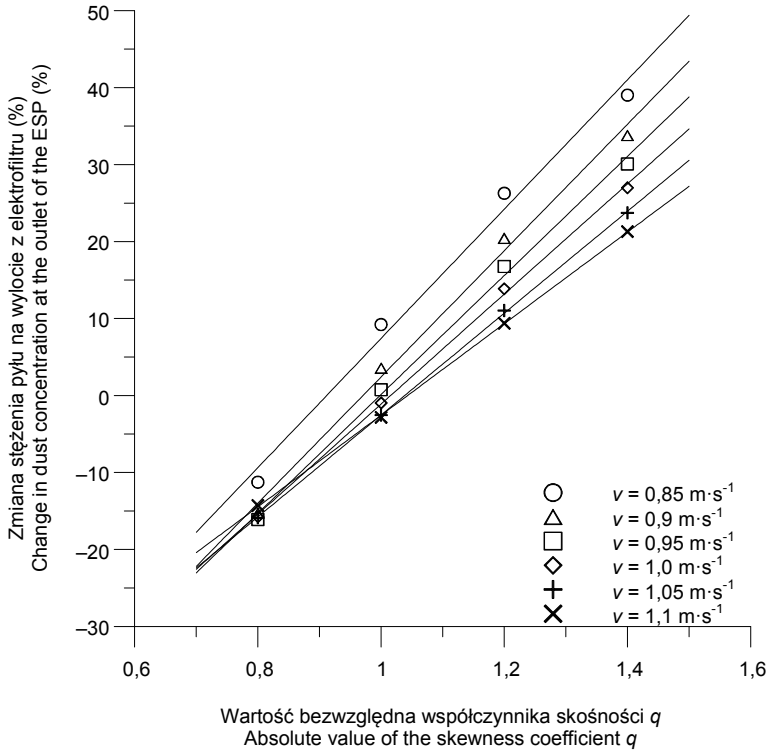


Rys. 3. Zmiana stężenia pyłu na wylocie z elektrofiltru czterostrefowego o liniowo-skośnym przepływie gazu (A-C-B) w odniesieniu do elektrofiltru o przepływie równomiernym z prędkością średnią o $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ mniejszą w funkcji współczynnika skośności q

Fig. 3. Change of dust concentration at the outlet of four-zone electrostatic precipitator with linear-skewed gas flow (type A-C-B) compared to the electrostatic precipitator with uniform gas flow with an average velocity of $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ smaller as a function of skewness coefficient q

wynoszą one od blisko -20% do około 45% , natomiast dla przepływu wklęsło-wypukłego – od około -30% do około 20% . Ujemne wartości zmiany koncentracji pyłu oznaczają jej wzrost w stosunku do wyniku uzyskanego dla odpowiedniego elektrofiltru bazowego.

Analizując zamieszczone na rysunkach 3-6 dane, można zauważyć, że dla obu typów niestandardowych przepływów gazu dla urządzeń o czterech i pięciu strefach odpylania zmiana stężenia pyłu na wylocie z elektrofiltru w odniesieniu do elektrofiltru bazowego rośnie wraz ze wzrostem wartości bezwzględnej współczynnika skośności q . Dla elektrofiltru czterostrefowego o liniowo-skośnym przepływie spalin zmniejszenie stężenia pyłu na wylocie z odpylacza następuje dla współczynnika skośności $|q| > 0,85$ dla średniej prędkości przepływu spalin $v_{sr} = 0,85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, natomiast w przypadku $v_{sr} = 1,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $|q| > 0,95$. W elektrofiltrze pięciostrefowym jest to odpowiednio $|q| > 0,90$ oraz $|q| > 1,05$. Poniżej tych granicznych wartości współczynnika skośności q niestandardowy



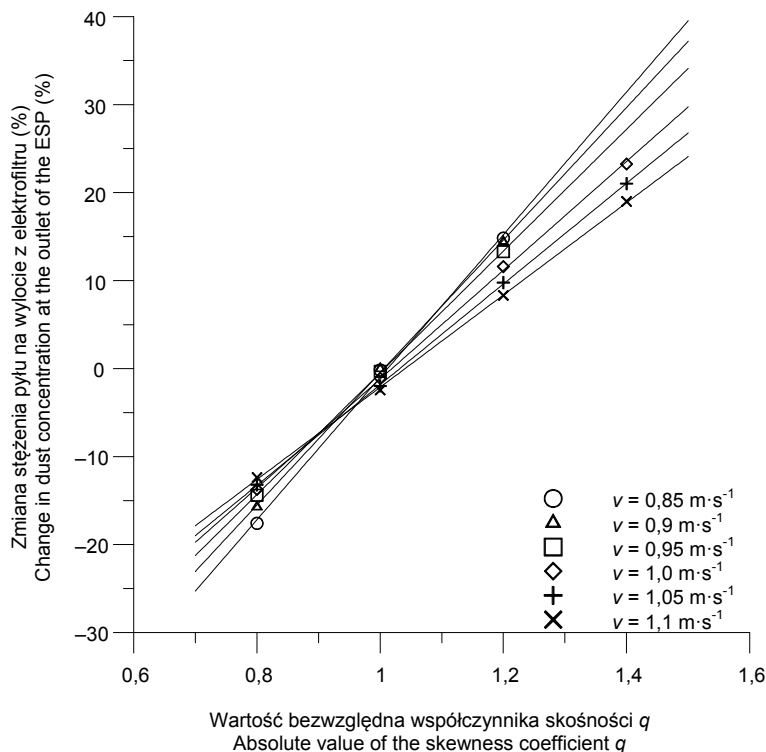
Rys. 4. Zmiana stężenia pyłu na wylocie z elektrofiltru pięciostrefowego o liniowo-skośnym przepływie gazu (A-C-B) w odniesieniu do elektrofiltru o przepływie równomiernym z prędkością średnią o $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ mniejszą w funkcji współczynnika skośności q

Fig. 4. Change of dust concentration at the outlet of five-zone electrostatic precipitator with linear-skewed gas flow (type A-C-B) compared to the electrostatic precipitator with uniform gas flow with an average velocity of $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ smaller as a function of skewness coefficient q

przepływ spalin nie może zrekompensować wzrostu stężenia pyłu na wylocie z urządzenia, spowodowanego wzrostem średniej prędkości spalin.

Istotny wydaje się przebieg prostych zestawionych na rysunkach 3 i 4. Zaobserwować można fakt, że dla wszystkich analizowanych wartości współczynnika q , zastosowanie liniowo-skośnej kombinacji pól prędkości jest najbardziej korzystne dla mniejszych średnich prędkości przepływu spalin. Wzrost tych wartości powoduje, że zmniejszenie koncentracji pyłu na wylocie z elektrofiltru staje się mniejsze. Zauważyć można również, że zmiana stężenia pyłu rośnie wraz ze wzrostem wartości bezwzględnej współczynnika skośności przepływu.

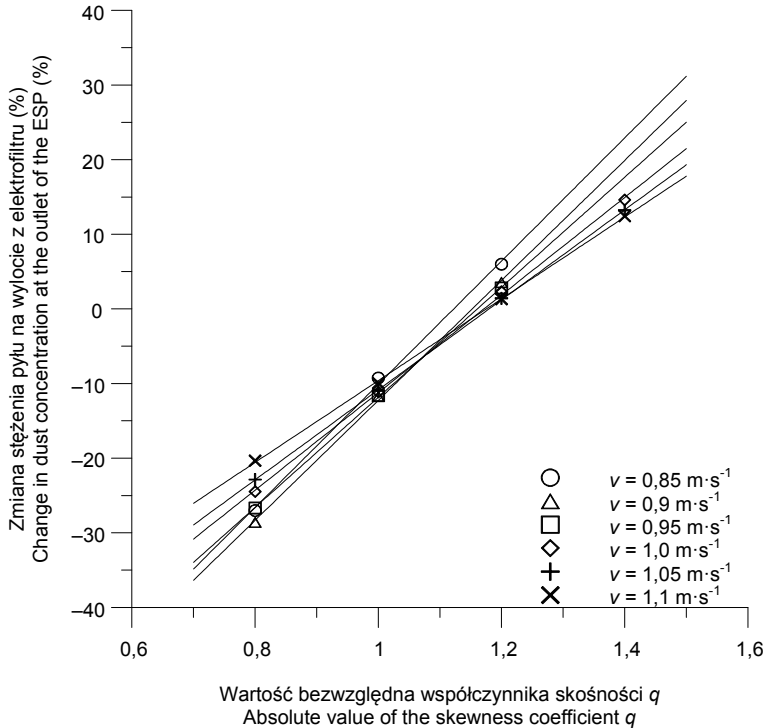
Dla przepływu wklęsło-wypukłego zależność zmiany stężenia pyłu na wylocie z elektrofiltru w funkcji współczynnika q wydaje się nieco bardziej skomplikowana (rys. 5 i 6). Proste na obu wykresach przecinają się dla $|q| \cong 1$. Dla urządzenia o czterech



Rys. 5. Zmiana stężenia pyłu na wylocie z elektrofiltru czterostrefowego o wklęsło-wypukłym przepływie gazu (D-C-E) w odniesieniu do elektrofiltru o przepływie równomiernym z prędkością średnią o $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ mniejszą w funkcji współczynnika skośności q

Fig. 5. Change of dust concentration at the outlet of four-zone electrostatic precipitator with concave-convex gas flow (type D-C-E) compared to the electrostatic precipitator with uniform gas flow with an average velocity of $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ smaller as a function of skewness coefficient q

strefach wartość ta jest również granicą, powyżej której następuje poprawa pracy odpylacza w odniesieniu do elektrofiltru bazowego. W odpylaczu pięciostrefowym granica ta wynosi odpowiednio $|q| \cong 1,05$ dla $v_{\text{sr}} = 0,85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ oraz $|q| \cong 1,15$ dla $v_{\text{sr}} = 1,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Porównując ze sobą rezultaty uzyskane dla badanych niestandardowych kombinacji pól prędkości, można stwierdzić, że dla obu typów przepływu przybliżoną, graniczną wartością współczynnika q zapewniającą obniżenie koncentracji pyłu, jest $|q| \cong 1,0$. Linio-wskośny profil prędkości spalin wydaje się korzystniejszy, pozwala bowiem na uzyskanie większej poprawy pracy elektrofiltru niż przepływ wklęsło-wypukły.



Rys. 6. Zmiana stężenia pyłu na wylocie z elektrofiltru pięciostrefowego o wklęsło-wypukłym przepływie gazu (D-C-E) w odniesieniu do elektrofiltru o przepływie równomiernym z prędkością średnią o $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ mniejszą w funkcji współczynnika skośności q

Fig. 6. Change of dust concentration at the outlet of five-zone electrostatic precipitator with concave-convex gas flow (type D-C-E) compared to the electrostatic precipitator with uniform gas flow with an average velocity of $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ smaller as a function of skewness coefficient q

Wnioski

1. Zastosowanie w elektrofiltrze niestandardowych, odpowiednio ukształtowanych przepływów spalin może jedynie w pewnym stopniu zrekompensować zmniejszenie skuteczności odpylania będące skutkiem wzrostu średniej prędkości spalin.

2. Zastosowanie w elektrofiltrze liniowo-skośnego typu przepływu spalin jest korzystniejsze niż zastosowanie przepływu wklęsło-wypukłego, pozwala bowiem na większą redukcję stężenia zapylenia na wylocie z elektrofiltru w szerszym zakresie wartości współczynnika skośności q .

3. Graniczną wartością współczynnika skośności przepływu q , powyżej której następuje poprawa skuteczności odpylania dla obu analizowanych typów przepływu, jest dla elektrofiltru czterostrefowego $|q| \cong 1$, a dla urządzenia pięciostrefowego $|q| \cong 1,1$.

Literatura

- BOYD M., 2001 a. Skewed Gas Flow Technology offers antidote to opacity derates. *Power Eng.* 105, 6. [www.power-eng.com].
- BOYD M., 2001 b. The evaluation of Skewed Gas Flow Technology. W: ICESP VIII Conference Papers. Birmingham, USA. [www.isesp.org].
- DEUTSCH W., 1922. Bewegung und Landung der Elektrizitätsträger im Zylinderkondensator. *Ann. Phys.* 373, 12: 335-344.
- GIBSON D., SCHMITZ W., HEIN A.G., 1998. Electrostatic precipitator skew gas flow technology application and quantification. W: ICESP VII Conference Papers. Kyongju, South Korea.
- HEIN A.G., GIBSON D., 1996 a. Electrostatic precipitator gas flow technology – ESKOM experience in South Africa. W: Proceedings of the Air & Waste Management Association's 89th Annual Meeting & Exhibition. Nashville, USA. [www.awma.org].
- HEIN A.G., GIBSON D., 1996 b. Skewed gas flow technology improves precipitator performance. ESKOM experience in South Africa. W: ICESP VI Conference Papers. Budapest, Hungary.
- JUDA J., NOWICKI M., 1986. Urządzenia odpylające. PWN, Warszawa.
- LOCKHART J., WEISS O., 2001. The application of Skewed Gas Flow Technology at the Israel Electric Corp. MDA Station. W: ICESP VIII Conference Papers. Birmingham, USA. [www.isesp.org].
- LUTYŃSKI J., 1965. Elektrostatyczne odpylanie gazów. WN-T, Warszawa.
- PARKER K.R., 1997. Applied electrostatic precipitation. Blackie Academic & Professional, London.
- PARKER K.R., 2003. Electrical operation of electrostatic precipitators. Institution of Electrical Engineers, London.
- SARNA M., 2005. Wybrane zagadnienia elektrostatycznego odpylania gazów przemysłowych. Wyd. AT-H, Bielsko-Biała.
- SCHMITZ W., GIBSON D., PRETORIUS L., 2001. Computational fluid dynamics modeling of collection dynamics. W: ICESP VIII Conference Papers. Birmingham, USA. [www.isesp.org].
- WHITE H.J., 1963. Industrial electrostatic precipitation. Addison-Wesley, London.

THE POSSIBILITY OF EFFICIENCY IMPROVING IN ELECTROSTATIC PRECIPITATOR BY UNEVEN GAS FLOW

Summary. The efficiency of dust removal in electrostatic precipitator depends on several factors inter alia the design parameters of the ESP, the electrical properties of the gas and dust particles properties. But the most important parameter, from the standpoint of this paper is the proper distribution of the gas flow in the ESP chamber. The effect of the gas distribution on the efficiency of the ESP has been known and studied since the 90s of last century. Identification of uneven velocity fields at the inlet and outlet of electrostatic precipitator improving the efficiency of the electrostatic precipitator were the subject of numerous experimental and theoretical studies. This paper presents the results of computer simulation of gas distribution influence on the efficiency of the electrostatic precipitator.

Key words: electrostatic precipitator (ESP), gas de-dusting efficiency, uneven gas flow, simulation analyses

Śladowska-Rybka B., Sarna M., 2011. Możliwość poprawy skuteczności odpylania w elektrofiltrze dzięki nierównomiernemu przepływowi spalin. *Nauka Przyr. Technol.* 5, 4, #75.

Adres do korespondencji – Corresponding address:

Beata Śladowska-Rybka, Instytut Ochrony i Inżynierii Środowiska, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała, Poland, e-mail: bsladowska@ath.bielsko.pl

Zaakceptowano do druku – Accepted for print:

16.08.2011

Do cytowania – For citation:

*Śladowska-Rybka B., Sarna M., 2011. Możliwość poprawy skuteczności odpylania w elektrofiltrze dzięki nierównomiernemu przepływowi spalin. *Nauka Przyr. Technol.* 5, 4, #75.*