
PRACE

**Instytutu Ceramiki
i Materiałów Budowlanych**

Scientific Works
of Institute of Ceramics
and Building Materials

Nr 32
(styczeń–marzec)

Prace są indeksowane w BazTech i Index Copernicus

ISSN 1899-3230

Rok XI

Warszawa–Opole 2018

EWA GŁODEK-BUCYK*
WOJCIECH KALINOWSKI**
MAREK WASILEWSKI***

Badania sprawności separacji dolnych cyklonów wymiennika w układzie wypalania klinkieru portlandzkiego

Słowa kluczowe: cyklonowy wymiennik ciepła, CFD, sprawność odpylania cyklonów, wypalanie klinkieru.

W artykule przedstawiono wyniki badań modelowych przepływu mieszaniny pyłowo-gazowej w dolnym cyklonie wymiennika ciepła pieca do wypalania klinkieru portlandzkiego. Badania zostały przeprowadzone z zastosowaniem modelowania CFD (*Computational Fluid Dynamic*). Przedmiotem badań była ocena wpływu zmiany kształtu zadaszania cyklonu (dwa warianty rozwiązań) oraz głębokości zanurzenia rury nurnikowej na sprawność odpylania. Zmiana kształtu zadaszania cyklonu ma minimalny wpływ na sprawność całkowitą odpylania. Wprowadzenie rury nurnikowej istotnie poprawia skuteczność odpylania cyklonu – dla modelu 1 o ok. 9% (z 59,8 na 65,3%), natomiast dla modelu 2 o 13% (z 58,1 na 65,8%).

1. Wprowadzenie

Nowoczesne instalacje wypalania klinkieru portlandzkiego metody suchej z krótkim piecem i kalcynatorem zawierają od 4 do 6 stopni cyklonów. W wieży wymienników cyklonowych następuje podgrzanie sproszkowanego materiału surowcowego od 50 do 850°C. W tym zakresie temperatury następuje usunięcie wilgoci resztkowej, podgrzewanie i dekarbonatyzacja nadawy piecowej (do ok. 95%). Wymiana ciepła pomiędzy gazami i tzw. mąką surowcową odbywa się w stanie zwieszenia w przeciwprądzie. Gazy odlotowe z pieca przepływają od

* Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu, e.glodek@icimb.pl

** Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu, w.kalinowski@icimb.pl

*** Dr inż., Politechnika Opolska, Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki, was.marek@gmail.com

spodu ku górze poprzez kolejne stopnie cyklonów. Natomiast nadawa surowca podawana jest z góry wieży wymiennika. Następuje proces mieszania fazy stałej i gazowej, podgrzewania materiału w transporcie pneumatycznym oraz separacji pyłu. W każdym kolejnym stopniu wymiennika procesy te realizowane są w coraz wyższej temperaturze. Według [1] udział strumienia wymienianego ciepła w pionowych wznoszących przewodach gazowych w stosunku do wymiany ciepła w cyklonach wynosi jak 80 do 20%. Ze względu na intensywność procesu wymiany ciepła pomiędzy gazem a mąką surowcową w stanie zawieszenia przyjmuje się, że cyklon służy głównie do oddzielania ciała stałego i gazu.

Głównymi parametrami charakteryzującymi procesy zachodzące w cyklonie są skuteczność odpylania ciała stałego i spadek ciśnienia gazu podczas przepływu przez cyklon. Zależą one od geometrii cyklonu i warunków technologicznych jego pracy. Parametry te wpływają bezpośrednio na koszty operacyjne. Dlatego też dąży się do zminimalizowania oporów przepływu gazu przez cyklon przy jednoczesnym osiągnięciu wysokiej sprawności odpylania cyklonów.

Cyklony górne, tzw. odpylające lub I stopnia, charakteryzują się wysoką sprawnością odpylania powyżej 90% [2–3, 5], gdyż ma to istotny wpływ na efektywność energetyczną procesu wypalania. Sprawność cyklonów pozostałych stopni jest niższa. Według danych literaturowych [2–5] stopień separacji dolnych cyklonów wieży wymiennika kształtuje się na poziomie 70–80%. W przypadku gdy cyklony nie posiadają rury nurnikowej, obserwuje się spadek sprawności separacji o 10–15% [5]. Fakt ten nabiera szczególnego znaczenia dla dolnych cyklonów wymiennika, które narażone są na działanie wysokich temperatur (temperatura materiału ok. 850°C, temperatura gazów do ok. 1000°C) oraz kontakt z mieszaniną spalin i materiału zawierających agresywne związki chemiczne. Znaczące zwiększenie udziału paliw alternatywnych współspalanych w instalacji wypalania klinkieru w ostatnich latach w istotny sposób wpłynęło na szybsze zużycie i skrócenie żywotności rur nurnikowych w ostatnim stopniu układu cyklonów [10]. Przy spalaniu paliwa alternatywnego powstają bowiem silnie korozyjne związki, rośnie udział składników zwiększających lotność alkaliów w tzw. obiegu wewnętrznym składników lotnych, a w procesie współspalania z paliwem konwencjonalnym ulegają zmianie warunki formowania płomienia, czemu towarzyszy zwykle podniesienie temperatury w tzw. zimnym końcu pieca [11]. Zwiększone udziały składników lotnych, zwłaszcza chloru siarki i alkaliów w procesie wypalania klinkieru są najczęstszą przyczyną powstawania narostów, głównie w obszarze dolnych cyklonów wymiennika ciepła, a zwiększona cyrkulacja pyłów, wynikająca z pogorszenia się sprawności odpylania cyklonu dolnego, dodatkowo sprzyja tym zakłóceniom. Odnosi się to zwłaszcza do instalacji wypalania klinkieru wyposażonych w układy prekalcytacji.

Kluczowym czynnikiem w eksploatacji cyklonów jest spadek ciśnienia, który rośnie wraz ze wzrostem prędkości gazu na wlocie. Dla typowej instalacji wypalania klinkieru z 4-stopniowym wymiennikiem ciepła całkowita strata ciśnienia na wymienniku cyklonowym wynosi ok. 5,0–6,0 kPa.

W literaturze przedmiotu znajduje się wiele publikacji opisujących wpływ wybranych elementów konstrukcji cyklonów na skuteczność separacji pyłów frakcji oraz na spadek ciśnienia [5–6, 12]. Niewiele jest natomiast publikacji dotyczących symulacji parametrów pracy cyklonów będących składową wieży wymiennika ciepła [13–14].

2. Badania przepływu mieszaniny pyłowo-gazowej w dolnym cyklonie wymiennika ciepła

Dla oceny wpływu wprowadzonych zmian konstrukcyjnych w cyklonie na jego sprawność odpylania przeprowadzono symulacje komputerowe przepływu mieszaniny pyłowo-gazowej przez dolny cyklon wieży wymienników. Badania zostały wykonane z zastosowaniem modelowania CFD (*Computational Fluid Dynamic*). W tym celu wykorzystano program ANSYS Fluent. Metodologia badań została opisana w pracy [2]. Jako kryterium do weryfikacji modelu wykorzystano wartości spadków ciśnienia cyklonu eksploatowanego w warunkach przemysłowych.

Badania przepływowe wykonano dla dwóch wersji konstrukcyjnych zadaszania cyklonu – cyklon z dachem płaskim (model 1) oraz dachem skośnym (model 2) w dwóch wariantach wyprowadzenia gazów z cyklonu: cyklon wyposażony w krótką rurę nurnikową oraz cyklon bez rury nurnikowej.

W tabelach 1 i 2 przedstawiono podstawowe parametry gazów i pyłów, które zostały przyjęte jako warunki brzegowe do obliczeń. Odpowiadają one geometrii dolnego cyklonu wymiennika cyklonowego oraz parametrom jego pracy.

Tabela 1

Analiza sitowa pyłu

Materiał	Powierzchnia	< 2,5 μm	< 10 μm	< 20 μm	< 60 μm	D50	D90	D97
	[m ² /kg]	[%]	[%]	[%]	[%]	[μm]	[μm]	[μm]
Mąka – cyklon wlot	471,49	0,10	23,00	59,00	85,00	16,00	111,00	< 200
Mąka – cyklon wylot	359,26	0,00	15,00	46,00	73,00	23,00	200,00	> 200
Komora wzniosu	351,40	0,01	15,00	42,00	72,00	25,00	< 200	> 200

Źródło: Tab. 1–5 – opracowanie własne.

T a b e l a 2

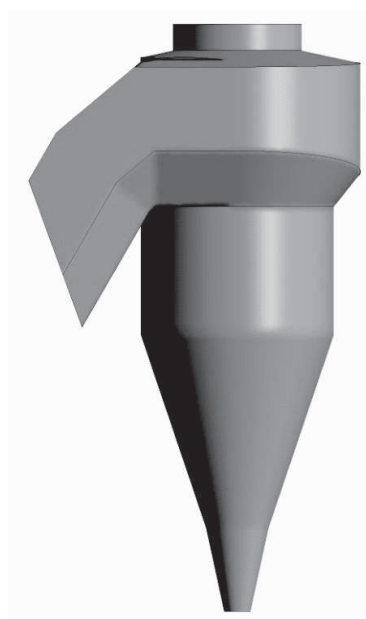
Warunki brzegowe przyjęte do obliczeń

Parametr	Jednostka	Wartość
Strumień objętości gazów	m ³ /s	398
Temperatura fazy gazowej	°C	950
Gęstość fazy gazowej	kg/m ³	0,3
Lepkość dynamiczna fazy gazowej	Pa·s	4,45·10 ⁻⁵
Gęstość fazy stałej	kg/m ³	2300

W pierwszym etapie zostały wykonane trójwymiarowe modele geometryczne badanych konstrukcji. Przedstawiono je na rycinie 1. Model 1 odpowiada konstrukcji cyklonu z płaskim dachem, natomiast model 2 – konstrukcji cyklonu z dachem skośnym.



model 1



model 2

Ź r ó d ł o: Ryc. 1–4 – opracowanie własne.

Ryc. 1. Geometria badanych cyklonów

W celu porównania parametrów pracy cyklonów (model 1 i 2) przeprowadzono obliczenia symulacyjne przy takich samych założeniach. Przedmiotem oceny była skuteczność separacji cząstek.

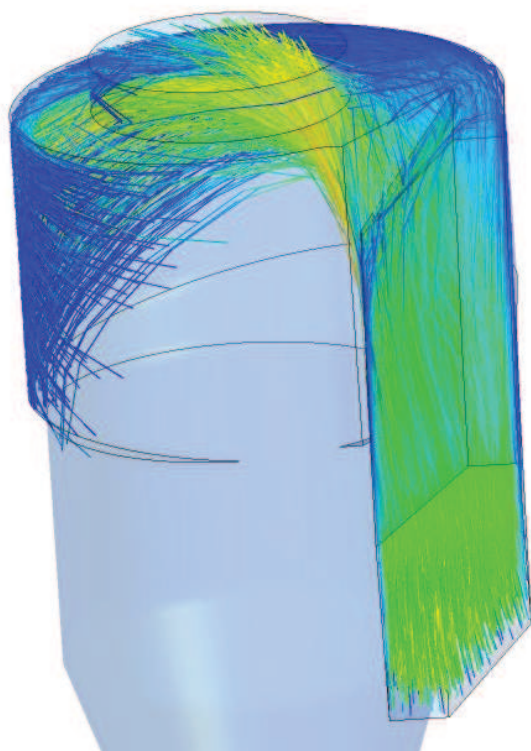
2.1. Badania wpływu kształtu zadaszania cyklonu na parametry pracy cyklonu

Całkowita skuteczność separacji porównywanych modeli jest na bardzo zbliżonym poziomie i wykazuje stosunkowo niskie wartości, sięgające 60% (tab. 3). Spowodowane jest to porywaniem cząstek pyłu, zaraz po ich wlocie, przez gazy opuszczające cyklon. W przypadku cząstek o wymiarze 150 μm skuteczność separacji w cyklonach technologicznych powinna wynosić ok. 100%. Jednakże w analizowanych modelach, przy braku rury nurnikowej, 12–14% pyłu o tej granulacji (kolor żółty) jest wyprowadzane z cyklonu zaraz po wlocie (ryc. 2).

T a b e l a 3

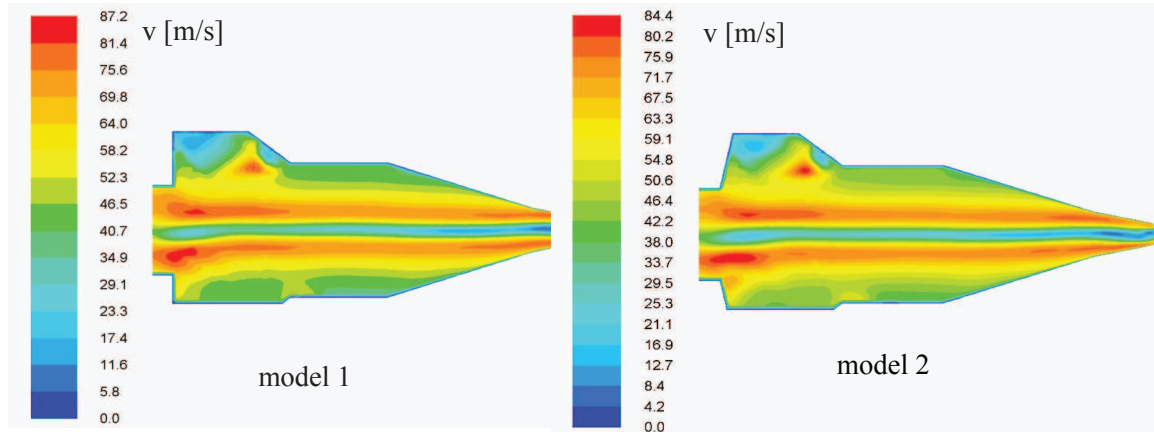
Skuteczność separacji fazy stałej (frakcyjna i całkowita) dla konstrukcji cyklonu bez rury nurnikowej

Średnica cząstki [μm]	Frakcyjna skuteczność separacji [%]	
	model 1	model 2
2,5	2	2
10,0	11	10
20,0	34	32
60,0	82	80
100,0	86	85
150,0	88	86
Całkowita skuteczność separacji	59,8	58,1



Ryc. 2. Trajektorie cząstek największych – 150 μm (po 0,5 s) (model 1)

Nieznaczne pogorszenie całkowitej sprawności odpylania cyklonu według modelu 2 ma prawdopodobnie związek z innym rozkładem prędkości gazów na wlocie (ryc. 3), a dzięki pochylonej płaszczyźnie zadaszania, skierowanej w stronę kanału wylotowego, zwiększonego przepływu strumienia w tym kierunku.



Ryc. 3. Rozkład pól prędkości dla konstrukcji cyklonu – wariant bez rury nurnikowej

2.2. Badania wpływu rury nurnikowej na parametry pracy cyklonu

Sprawność odpylania cyklonu można poprawić przez zainstalowanie rury nurnikowej, zwanej też kanałem wznosnym lub kanałem centralnym cyklonu. Jego zadanie to ukierunkowanie wiru zstępującego i utrudnienie bezpośredniego porwania cząstek stałych przez wir wstępujący w kierunku wylotu z cyklonu.

Obliczenia sprawności odpylania cyklonów wykonano dla obu wersji konstrukcyjnych zadaszania cyklonu – cyklon z dachem płaskim (model 1) oraz z dachem skośnym (model 2) dla różnych długości rury nurnikowej.

W tabelach 4–5 zestawiono obliczenia sprawności odpylania cyklonu wyposażonego w rurę nurnikową.

Tabela 4

Skuteczność separacji fazy stałej (frakcyjna i całkowita) model 1

Średnica cząstki [μm]	Długość rury nurnikowej		
	1,2 m	0,5 m	0 m
	frakcyjna skuteczność separacji [%]		
2,5	2	2	2
10,0	11	11	11
20,0	36	35	34
60,0	92	83	82
100,0	93	87	86
150,0	97	89	88
Całkowita skuteczność separacji	65,3	60,6	59,8

Tabela 5

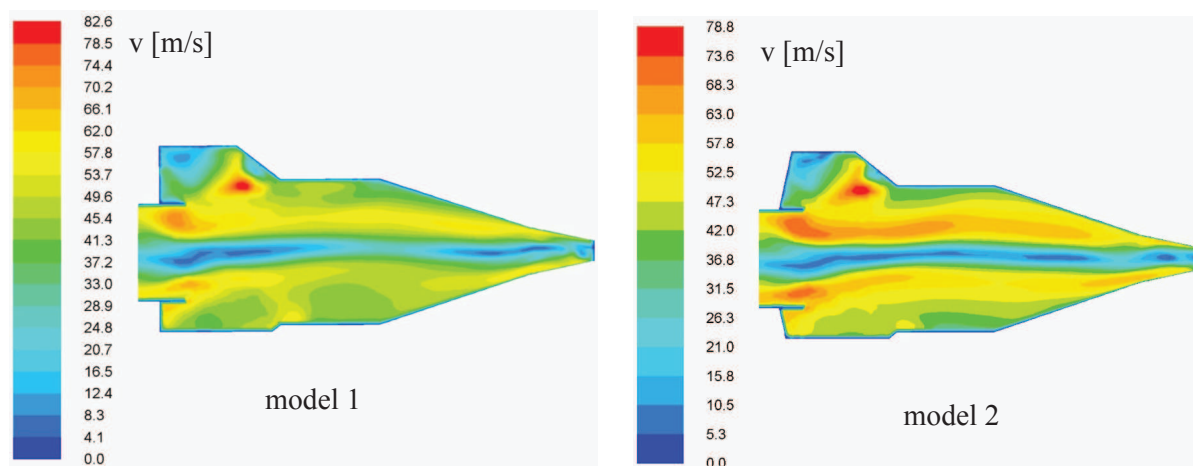
Skuteczność separacji fazy stałej (frakcyjna i całkowita) model 2

Średnica cząstki [μm]	Długość rury nurnikowej		
	1,2 m	0,5 m	0 m
	frakcyjna skuteczność separacji [%]		
2,5	2	2	2
10,0	10,5	10	10
20,0	35	33	32
60,0	91	82	80
100,0	97	86	85
150,0	99	88	86
Całkowita skuteczność separacji	65,8	59,4	58,1

Skuteczność całkowitej separacji obu modeli cyklonów jest niemal identyczna (tabela 4–5). Zauważa się natomiast wyraźny wpływ rury nurnikowej na poprawę skuteczności separacji cyklonu. Odnosi się to zarówno do całkowitej skuteczności separacji – dla modelu 1 o ok. 9%, dla modelu 2 o 13% – jak i frakcyjnej, zwłaszcza dla grubszych frakcji ($> 60 \mu\text{m}$).

Trzeba jednocześnie zauważyć, że obliczeniowe wartości sprawności odpylania stanowią pewne przybliżenie rzeczywistości i mogą być niższe niż osiągnięte w rzeczywistości. Nie wszystkie zjawiska występujące w rzeczywistym procesie da się uchwycić, a obecnym etapem rozwoju technik obliczeniowych i procedur badawczych. Aktualnie stosowane modele nie uwzględniają zjawisk aglomeracji i kolizji poruszających się cząstek, nie biorą też pod uwagę wtórnego porwania cząstek, wydzielonych ze strumienia głównego. Dodatkowym problemem stanowią zmiany własności materiałów (gęstość, rozmiar cząstek) związane reakcjami chemicznymi zarówno na powierzchni, jak i wewnątrz ziaren materiału (kondensacja alkaliów, dekarbonizacja węglanów) oraz możliwe zmiany własności fizykochemicznych (skład i gęstość gazów, dopłukiwanie koksiku itd).

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki symulacji rozkładu prędkości dla cyklonu zaprojektowanego w krótką rurę nurnikową, o długości ok. 1/3 średnicy wylotowej cyklonu.



Ryc. 4. Rozkład pól prędkości dla badanych modeli

Porównując powyższe wyniki (ryc. 4) z rozkładem prędkości w cyklonach bez rury nurnikowej (ryc. 3), można zauważyć, że wir wstępujący w cyklonach wyposażonych w rurę nurnikową charakteryzuje się mniejszą szerokością oraz niższymi prędkościami wiru. Nie wywołuje to tak intensywnego przepływu gazów w kierunku osiowym, dzięki czemu nie osłabia działania sił bezwładności na cząstki pyłu i pozytywnie wpływa na sprawność odpylania. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że korzystniejszymi własnościami przepływowymi charakteryzują się cyklony wyposażone choćby w krótką rurę nurnikową.

4. Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że:

- Zmiana kształtu zadaszania cyklonu w założonych granicach ma minimalny wpływ na sprawność całkowitą odpylania. Porównywalne wartości uzyskano zarówno dla cyklonów pozbawionych rur nurnikowych, jak i wyposażonych w rury o jednakowej długości.
- Całkowita skuteczność separacji porównywanych modeli cyklonów (bez rury centralnej) wykazuje stosunkowo niskie wartości, sięgające 60%.
- Sprawność odpylania cyklonu można poprawić poprzez zainstalowanie wewnątrz cyklonów elementów, zadaniem których jest zmniejszenie efektu porywania cząstek pyłu przez strumień gazu opuszczający cyklon. Wprowadzenie rury nurnikowej istotnie poprawia skuteczność odpylania cyklonu – dla modelu I o ok. 9% (z 59,8. na 65,3%), natomiast dla modelu II o 13% (z 58,1 na 65,8%).
- Z uzyskanych danych rozkładu prędkości w badanych modelach wynika, że w cyklonach nieposiadających rury nurnikowej wir wstępujący charakteryzuje się wyższymi prędkościami wiru, niż w cyklonach wyposażonych w rurę nurni-

kową. Wywołuje to intensywniejszy przepływ gazów w kierunku osiowym, co pogarsza działanie sił bezwładności i ujemnie oddziałuje na sprawność odpylania.

Literatura

- [1] D u d ł H., *Cement Data Book. International Process Engineering in the Cement Industry*, B. u e r l g G m b H W i e s b e n, Berlin–London 1976.
- [2] W ł s i l e w s k i M., G ł o d e k - B u c y k E., K ł i n o w s k i W., *Weryfikacja modeli numerycznych CFD na przykładzie odpylaczy cyklonowych stosowanych w cyklonowym wymienniku ciepła*, „Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych” 2017, nr 29, s. 76–89.
- [3] D u d ł J., W ł s i l e w s k i M., *Wpływ modernizacji cyklonowych wymienników ciepła na energochłonność procesu wypalania klinkieru*, „Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych” 2012, nr 11, s. 20–29.
- [4] *Zasady eksploatacji pieców obrotowych w procesie wypalania klinkieru cementowego*, red. E. N o w ł k, „Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych” 1998, nr 22.
- [5] A l s o p P. A., *Cement plant Operations Handbook for Dry-Process Plants*, 6.ed., T r e d s h i p P u b l i c a t i o n L t d 2014.
- [6] W ł r y c h J., *Aparatura chemiczna i procesowa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998.
- [7] K ł p a A., *Poprawa sprawności separatora cyklonowego poprzez dodatkowe podsysanie gazu*, „Modelowanie Inżynierskie” 2015, nr 55, http://www.kms.polsl.pl/mi/pelne_24/09_24_55.pdf (20.06.2017).
- [8] P a r i h a r A. K. S., J o s h i C h., S r i d h a r G., *The performance of cyclones in producer gas cleaning: experimental and modeling studies*, „Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part A: Journal of Power and Energy” 2012, s. 1–18.
- [9] Q i a n F., H u a n g Z., C h e n G., Z h a n g M., *Numerical study of the separation characteristics in a cyclone of different inlet particle concentrations*, „Computers and Chemical Engineering” 2007, Vol. 31, No. 9, s. 1111–1122.
- [10] G a w l i k J., H ü b n e r K., K ł p i Ń s k i A., S c h m i d t J., *Badanie procesów degradacji eksploatowanych odlewów do rur nurnikowych cyklonowych wymienników ciepła IV stopnia*, http://www.ptzp.org.pl/files/konferencje/kzz/arttyk_pdf_2015/T1/t1_0667.pdf (20.06.2017).
- [11] K a l i n o w s k i W., J a n e c k a L., *Zakłócenia procesu wypalania klinkieru przy zwiększonym udziale paliw alternatywnych*, „Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych” 2013, nr 15, s. 30–44.
- [12] K a b s c h P., *Odpylanie i odpylacze*, WNT, Warszawa 1992.
- [13] M a r i a n i F., R i s i F., P o g g i a n i C., *Numerical study of the separation efficiency and heat exchange performance in a complex gas–solid separator*, „International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements” 2016, Vol. 4, No. 2, s. 142–152.
- [14] K a s h a n i E., M o h e b b i A., H e i d a r i M. G., *CFD simulation of the preheater cyclone of a cement plant and the optimization of its performance using a combination of the design of experiment and multi-gene genetic programming*, „Powder Technology” 2018, Vol. 327, s. 430–441.

*EWA GŁODEK-BUCYK
WOJCIECH KALINOWSKI
MAREK WASILEWSKI*

STUDY OF THE SEPARATION EFFICIENCY OF THE PREHEATER
LOWER CYCLONES IN THE PORTLAND CLINKER BURNING SYSTEM

Keywords: cyclone heat exchanger, CFD, cyclone dedusting efficiency, clinker burning.

The paper presents the study of a gas-dust mixture flow in the lower cyclone of suspension preheater kilns. The research carried out with the use of CFD-Computational Fluid Dynamics modeling. The subject of the research was to assess the impact of cyclone roofing changes and the vortex finder length on the dust removal efficiency. The cyclone roof shape (without a vortex finder) has a minimal effect on the overall dust extraction efficiency. The application of the vortex finder significantly improves cyclone removal efficiency – for model 1 by about 9% (from 59.8% to 65.3%) and for model 2 by 13% (from 58.1% to 65.8).