

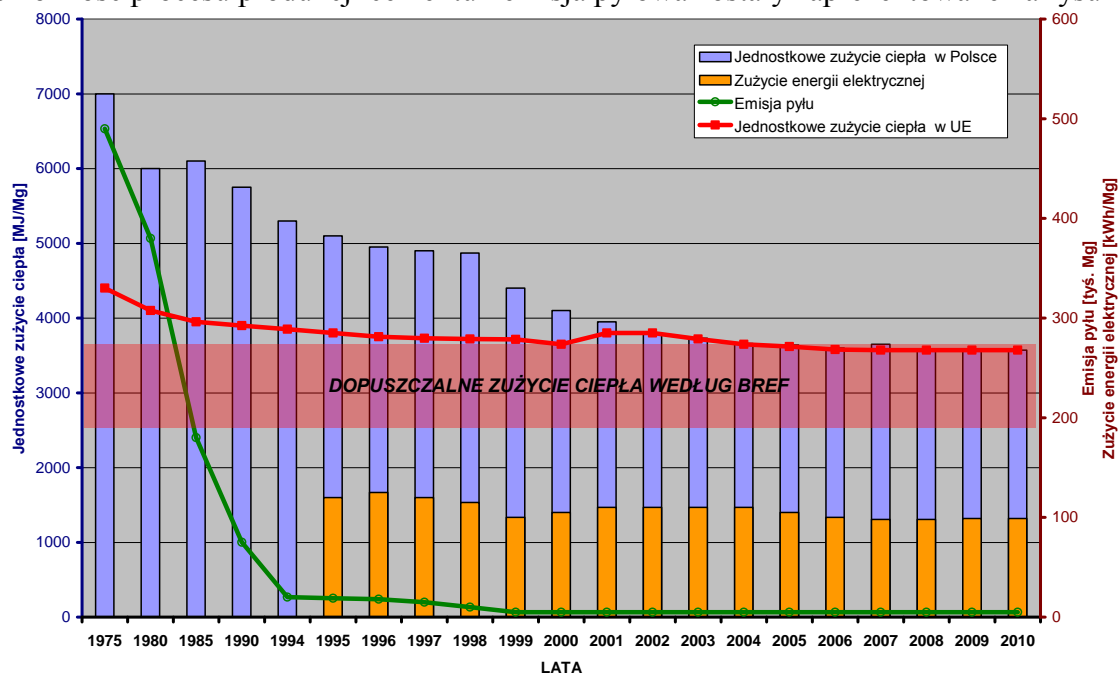
WASILEWSKI Marek¹
 DUCZKOWSKA-KĄDZIEL Anna²
 DUDA Jerzy³

Wpływ ukształtowania wlotu rury nurnikowej na skuteczność pracy I stopnia cyklonowego wymiennika ciepła

WSTĘP

Zagadnienia racjonalnego gospodarowania zasobami naturalnych surowców od zawsze wywierały duży wpływ na szybkość i harmonijność rozwoju światowego przemysłu. Zagadnienia te obejmują również gospodarkę zasobami naturalnymi surowców energetycznych i źródeł energii. Dotyczy to w dużej mierze przemysłu cementowego, gdzie gospodarka paliwowo-energetyczna ma z dawna ugruntowaną i przy tym wysoką rangę. Wynika to z faktu, iż udział kosztów samego tylko paliwa technologicznego w kosztach wytwarzania cementu jest stosunkowo duży. Wysokie ceny paliw – przy dużej energochłonności procesu produkcji – zmuszają producentów do poszukiwania wszelkich możliwych sposobów zmniejszania rozchodu energii w procesie wytwarzania cementu.

Na przełomie XX i XXI wieku nastąpił dynamiczny rozwój nowych energooszczędnych technik produkcji cementu. Potrzeba zmian nie wynika tylko z dążenia do obniżenia energochłonności wytwarzania cementu, ale duży wpływ na to ma dążenie do ograniczenia szkodliwego oddziaływania tego procesu na środowisko. Wzrost cen energii oraz coraz ostrzejsze normy IPPC (*Integrated Pollution Prevention Control*) dotyczące dopuszczalnych emisji gazowych i pyłowych, to główne czynniki wpływające na zmiany technologiczne w procesie wypału klinkieru. Energochłonność procesu produkcji cementu i emisja pyłowa zostały zaprezentowane na rysunku 1.



Rys. 1. Energochłonność i emisja pyłowa w procesie produkcji cementu w Unii Europejskiej [1]

Duży wpływ na ekonomię (energochłonność) produkcji cementu wywarło zastosowanie metody suchej. W typowej metodzie suchej nadawa piecowa w postaci mączki (po procesie homogenizacji) jest podawana do zewnętrznego cyklonowego wymiennika ciepła, a następnie trafia do pieca. Z kolei

¹Politechnika Opolska, Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki, 45-758 Opole, ul. Prószkowska 76, m.wasilewski@po.opole.pl

²Politechnika Opolska, Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki, 45-758 Opole, ul. Prószkowska 76, a.duczowska-kadziel@po.opole.pl

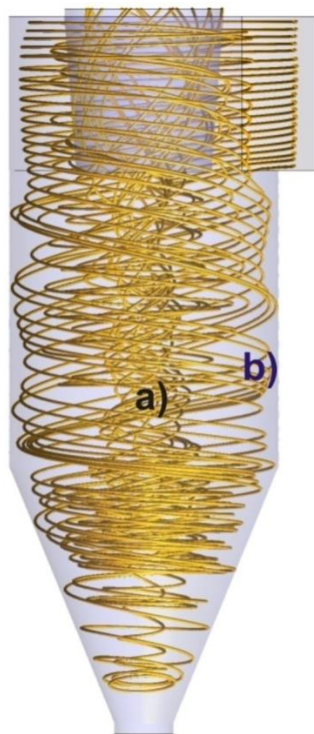
³Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nysie, 48-300 Nysa, ul. Armii Krajowej 7, jerzyduda@onet.eu

wychodzący z pieca obrotowego klinkier cementowy o temp. ok. 1300 °C chłodzony jest następnie w chłodniku rusztowym lub planetarnym do temperatury ok. 70 °C. W nowoczesnych instalacjach wieże wymiennikowe wyposażone są dodatkowo w prekalcyntor. Zasada działania cyklonowego wymiennika ciepła została omówiona m. in. w pracach [2, 3].

Wprowadzone zmiany pozwalają na suszenie, podgrzewanie i kalcynację (do około 90%) poza piecem. Ciągłe udoskonalanie metody suchej wpłynęło także na zwiększenie zdolności produkcyjnych. Obecnie w Europie wydajność większości instalacji wynosi od 3000 do 5000 ton/dobę. Największe jednostki pracują na rynku azjatyckim. Ich wydajność przekracza 10000 ton/dobę [4]. W dużym stopniu wydajność oraz energochłonność instalacji piecowej uwarunkowana jest od konstrukcji cyklonów I stopnia wieży wymiennikowej, tzw. cyklonów odpylających.

1 SPRAWNOŚĆ CYKLONÓW I STOPNIA

Zasada działania odpylaczy cyklonowych opiera się na wykorzystaniu siły odśrodkowej wywołanej przez ruch wirowy płynów. Mieszanina wielofazowa gaz-ciało stałe doprowadzana jest do górnej części cyklonu. Podczas przepływu przez cyklon następuje zagęszczenie fazy stałej w okolicach ścianek cylindra zewnętrznego, a w skutek przepływu o charakterze spiralnym w dół, następuje transport fazy stałej w dolne rejony odpylacza aż do kanału spustowego. Z kolei faza gazowa tworzy początkowo opadający wir zewnętrzny, a po zmianie kierunku przepływu w dolnej części cyklonu jest transportowana ku górze (tworzy tzw. wir wznoszący wewnętrzny). Następnie wydostaje się na zewnątrz urządzenia przez centralnie umieszczony kanał wylotowy. Na rysunku 2 zobrazowano przykładowy wir wewnętrzny i zewnętrzny gazów, uzyskany podczas realizacji opisanych w niniejszej pracy badań.

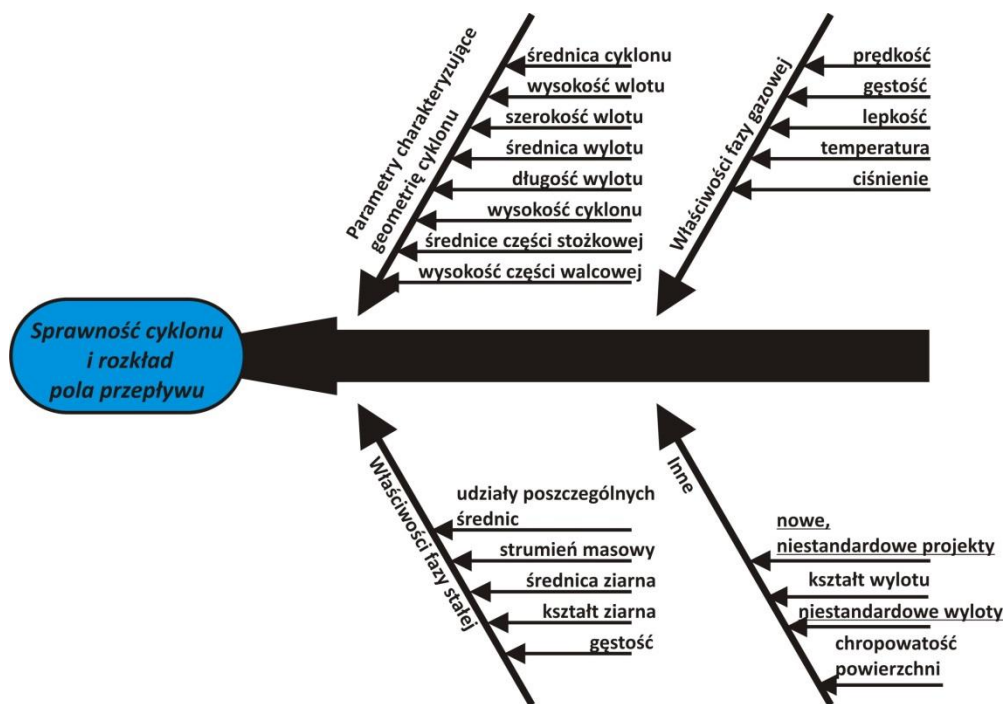


Rys. 2. Przykładowy wir wewnętrzny (symbol a) oraz zewnętrzny (symbol b) [opracowanie własne]

W klasycznych odpylaczach cyklonowych, stosowanych wyłącznie do kontroli zanieczyszczenia powietrza sprawność definiowana jest poprzez spadek ciśnienia oraz skuteczność separacji fazy stałej. Wszelkie prace mające na celu optymalizację ich konstrukcji wymagają pełnego poznania charakteru przepływu wewnątrz aparatu. Przepływ mieszaniny fazy gazowej i stałej w cyklonie ma charakter złożony, trudny do opisu matematycznego [5–7]. W celu pełnego zobrazowania wszystkich czynników wpływających na pracę cyklonów, autorzy opracowali diagram przyczynowo-skutkowy Ishikawy. Został on zaprezentowany na rysunku 3.

W instalacji piecowej metody suchej produkcji cementu, gdzie cyklony odpowiedzialne są dodatkowo za regulację procesu technologicznego (podgrzewanie i dekarbonizację mąki piecowej) główny nacisk kładzie się na skuteczność odpylania. Dotyczy to w szczególności cyklonów I stopnia, dla których wymagana jest skuteczność odpylania powyżej 90%. Wynika to potrzeby minimalizacji zjawiska opuszczania układu przez nieodseparowane cząstki surowca, w celu maksymalizacji zdolności produkcyjnej.

W związku tym, że duży wpływ na sprawność cyklonów I stopnia odgrywa sposób odprowadzenia gazów (procesowych oraz spalin), celem niniejszej pracy była analiza i opis zjawiska przepływu wielofazowego w okolicach wylotu z cyklonu.



Rys. 3. Czynniki decydujące o sprawności odpylaczy cyklonowych [opracowanie własne]

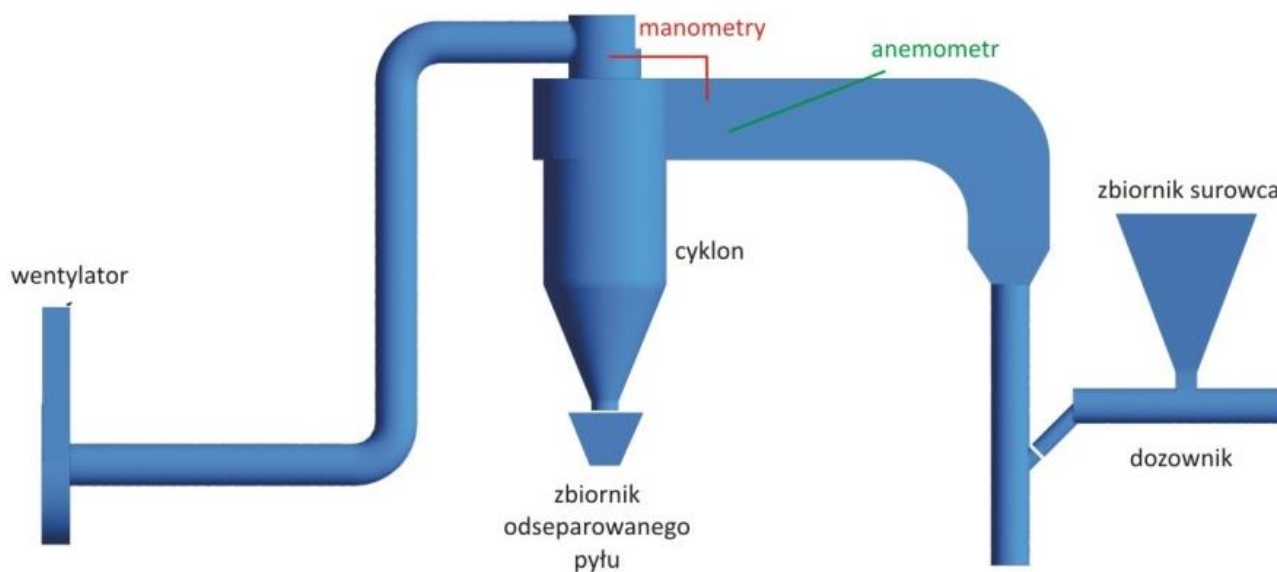
2 METODYKA BADAŃ

W celu właściwej analizy i opisu zjawiska przepływu mieszaniny gazów oraz mąki piecowej podjęto badania w oparciu o dwie metody badawcze. Dla modelu aparatu odwzorowującego rzeczywistą konstrukcję cyklonu I stopnia przeprowadzono analizę z wykorzystaniem techniki modelowania numerycznego przepływów (*Computational Fluid Dynamics – CFD*). Równolegle zaprojektowano i wykonano instalację doświadczalną umożliwiającą przeprowadzenie badań eksperymentalnych. Następnie została wykonana seria badań dla tych samych warunków pracy odpylacza, przyjętych dla analizy CFD. Pozwoliło to na przeprowadzenie walidacji zastosowanych metod badawczych.

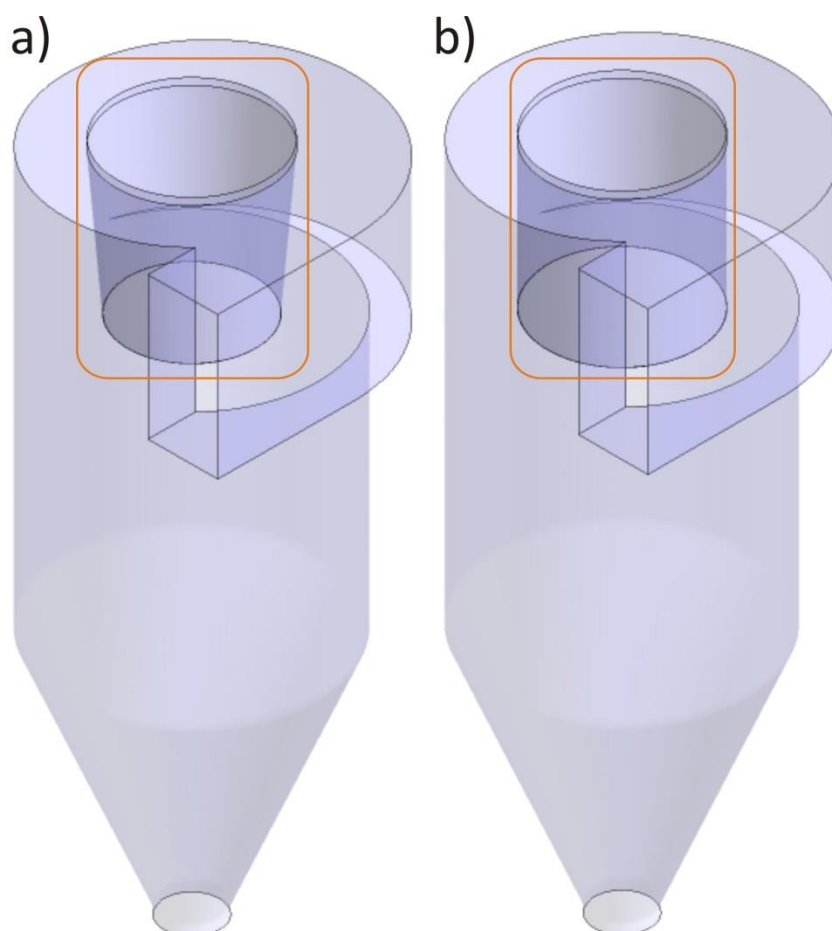
Na rysunku 4 przedstawiono schemat instalacji badawczej. Podstawowymi elementami stanowiska były: model cyklonu (rysunek 5), zbiornik surowca (rzeczywistej mąki piecowej), dozownik, wentylator wyposażony w falownik oraz zbiornik odseparowanych cząstek ciała stałego. Ze względu na duży udział tzw. drobnego ziarna ($< 15\mu\text{m}$) układ na wylocie został zamknięty odpylaczem tkaninowym. Aparaturę pomiarową stanowiły:

- manometry cieczowe dwuramienne, umożliwiające określenie ciśnienia na wlocie i wylocie z cyklonu,
- termooanemometr Voltcraft PL-135 HAN - umożliwiający pomiar prędkości fazy gazowej na wlocie do cyklonu,
- czterokanałowy rejestrator temperatury i wilgotności Testo.

Niezbędne okazało się także ustalenie udziału poszczególnych frakcji w całym strumieniu mąki piecowej. Do realizacji tego zadania wykorzystano granulometr laserowy Mastersizer 2000. Zasada działania tego urządzenia opiera się na zjawisku dyfrakcji światła laserowego.



Rys. 4. Schemat instalacji doświadczalnej



Rys. 5. Model cyklonu I stopnia wraz z dwoma badanymi konstrukcjami wylotów z aparatu

Druga z metod badawczych polegała na wykorzystaniu technik CFD. Modelowanie zjawisk cieplno-przepływowych jest zadaniem złożonym. Punktem wyjścia przy rozwiązywaniu zagadnień

związanych z modelowaniem numerycznym przepływów są uniwersalne prawa zachowania pędu, masy i energii. Bazując na tych równaniach, można stworzyć modele procesowe, pozwalające na symulowanie wszelkiego rodzaju przepływów jedno- i wielofazowych.

Do podstawowych zalet badań numerycznych CFD można zaliczyć:

- pełną wizualizację wyników obliczeń projektowanego urządzenia,
- kompleksowy dostęp do potrzebnych informacji o zmiennych, które dotyczą przepływu,
- proste dokonywanie zmian konstrukcyjnych i śledzenie ich wpływu na pracę urządzenia,
- możliwość zbadania pracy urządzenia w dowolnych warunkach, które dla celów pomiarowych w warunkach laboratoryjnych jest niezwykle trudno wytworzyć lub są one niebezpieczne,
- obniżenie kosztów związanych z pracami badawczymi.

Złożony proces nakładania się niestabilności podczas przepływu wewnątrz cyklonu jest głównym powodem powstawania burzliwości, zwanej często przepływem turbulentnym. Aby właściwie odwzorować ten rodzaj przepływu w modelowaniu CFD, konieczne było zastosowanie odpowiedniego modelu turbulentnego. W tym przypadku skorzystano z metody *Reynolds-Avaraged Navier-Stokes Equations* (RANS), natomiast do wyznaczenia naprężeń turbulentnych zastosowano hipotezę Boussinesqua. Założył on, że naprężenia turbulentne Reynoldsa mogą być powiązane z tensorem średnich prędkości deformacji w sposób podobny, jak model płynu Newtona wiąże naprężenia lepkościowe z tym tensorem. Różnica polega na tym, że w przypadku naprężeń turbulentnych współczynnikiem proporcjonalności jest dynamiczny współczynnik lepkości turbulentnej. Ten współczynnik nie jest cechą fizyczną płynu, lecz cechą przepływu zależną od charakteru turbulencji. Boussinesq założył, że współczynnik lepkości turbulentnej jest skalarem, podczas gdy turbulentny stan naprężeń w płynie jest silnie trójwymiarowy i aby to w sposób pełny opisać, współczynnik lepkości turbulentnej powinien być tensorem. Po uwzględnieniu powyższej hipotezy otrzymujemy równanie Naviera-Stokesa przepływu uśrednionego, uzupełnione członem zawierającym składowe fluktuacyjne [8-11]:

$$\frac{\partial(\rho \bar{w}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{w}_i' w_j')}{\partial x_j} = -\frac{\bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{ef} \left(\frac{\partial \bar{w}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{w}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial \rho k}{\partial x_i} - g \rho \beta (T - T_0) \quad (1)$$

gdzie:

\vec{w}_i – składowe wektora prędkości ($\vec{w}_x, \vec{w}_y, \vec{w}_z$)

x_i – współrzędne kartezjańskie (x, y, z)

t – czas

p – ciśnienie

ρ – gęstość płynu

g – przyspieszenie ziemskie

β – współczynnik rozszerzalności objętościowej

T – temperatura

T_0 – temperatura w dużej odległości od powierzchni wymiany ciepła

μ_{ef} – suma współczynników lepkości laminarnej i turbulentnej

w_i' – fluktuacja składowych wektora prędkości (zapis tensorowy w kierunku x_i, x_j, x_k)

k – energia kinetyczna turbulencji

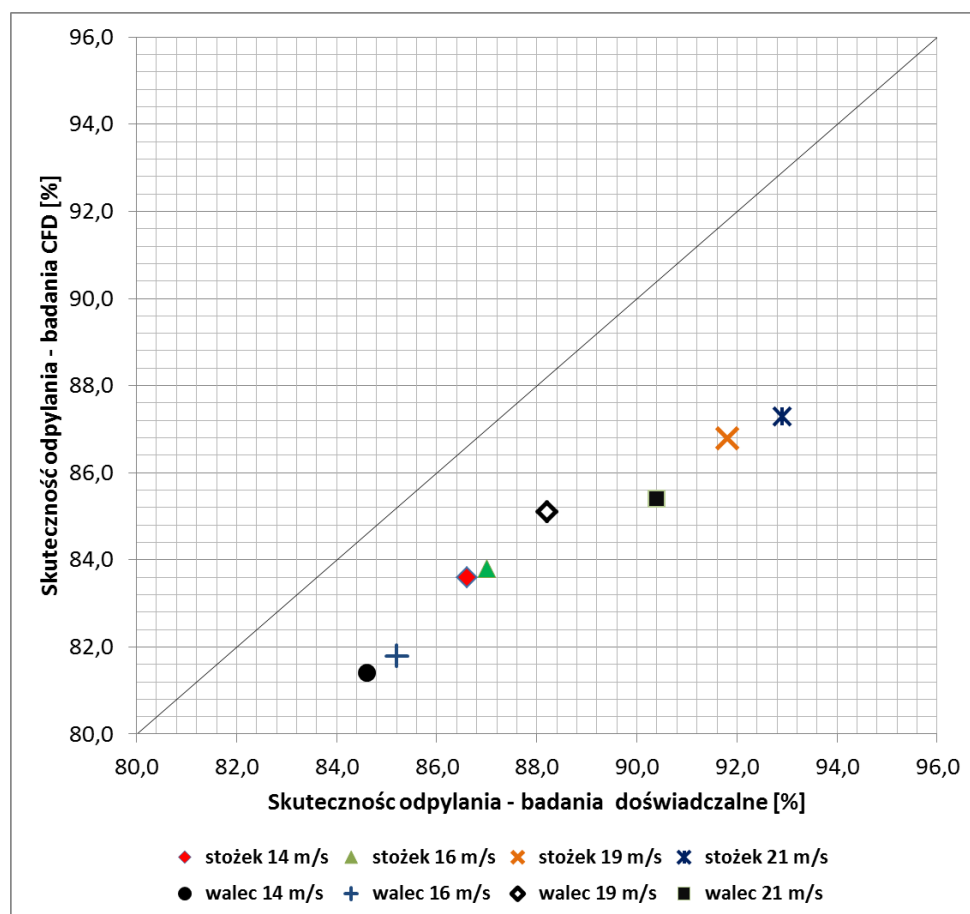
Rozwiązanie tego równania wymaga sformułowania hipotezy zamykającej, tzw. modelu szczegółowego. Pozwoli to na zrównanie wszystkich niewiadomych z liczbą niezależnych równań. W tym, przypadku wybrano model *Reynolds Stress Model* (RSM), umożliwiający odwzorowanie naprężeń o charakterze wysoce anizotropowym.

Obecność fazy stałej została odwzorowana za pomocą metody Eulera-Lagrange'a realizowanej w ANSYS FLUENT jako model dyskretny fazy *DiscretePhase Model* (DPM). W metodologii tej płyn jest traktowany jako faza ciągła (obliczenia polegają na rozwiązaniu równania N-S), natomiast faza rozproszona identyfikowana jest poprzez śledzenie cząstek (obliczenie pola przepływu).

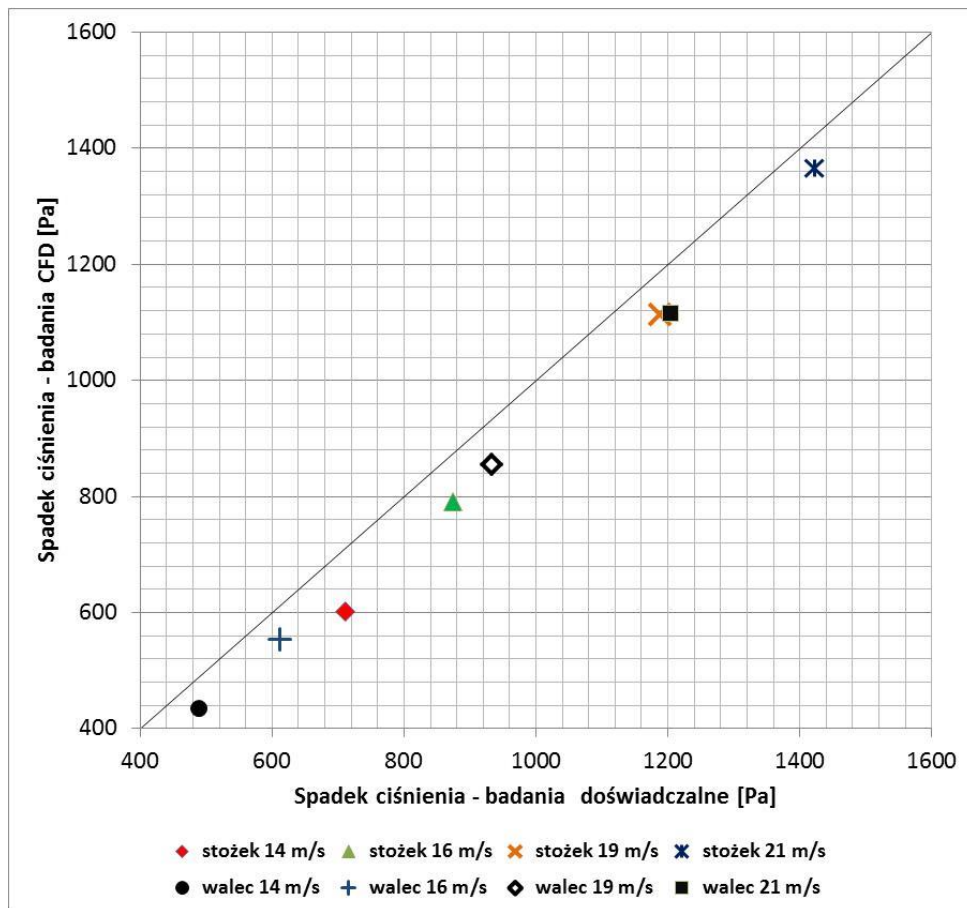
3 ANALIZA WYNIKÓW

W celu pełnego zobrazowania zjawiska przepływu, badania przeprowadzono dla czterech różnych prędkości wlotowych do cyklonu (14 m/s, 16 m/s, 19 m/s oraz 21 m/s). Badania eksperymentalne były przeprowadzone trzykrotnie dla każdego z wariantu. Do analizy przyjęto wartości średnie.

W pierwszym etapie dokonano walidacji uzyskanych wartości spadku ciśnienia oraz wartości skuteczności odpylania, z wykorzystaniem dwóch metod badawczych. Celem tego procesu było oszacowanie ilościowe błędów wynikających z poczynionych założeń w modelu, który został rozwiązany numerycznie. Przedstawione wyniki wyraźnie wskazują na dużą zbieżność. Pozwala to stwierdzić, że rezultaty eksperymentu wykazały skuteczność zastosowanych modeli numerycznych oraz właściwe sparametryzowanie warunków obliczeniowych i brzegowych. Na rysunku 6 przedstawiono graficzne zestawienie uzyskanych wyników skuteczności odpylania, natomiast rysunek 7 obrazuje wartości spadku ciśnienia.



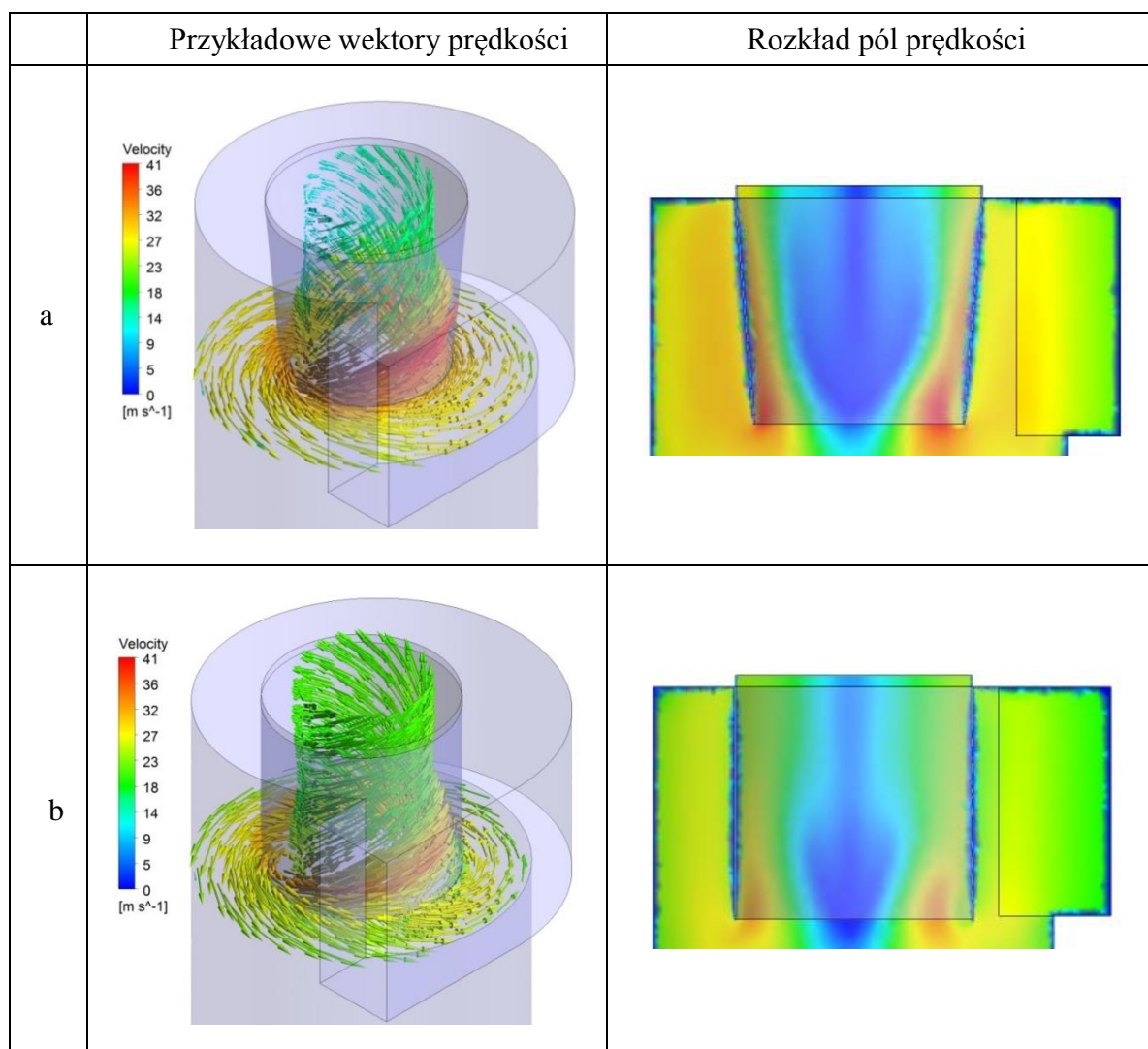
Rys. 6. Porównanie wyników skuteczności odpylania



Rys. 7. Porównanie wyników skuteczności odpylania

Uzyskany rozkład pól prędkości w okolicach wylotu z cyklonu (rysunek 8) wskazuje, że dla rury nurnikowej w kształcie walca (b) uzyskano mniejszą burzliwość przepływu niż w przypadku stożka (a). Przekłada się to także na mniejszą prędkość osiową w pobliżu ścianek cyklonu, a docelowo także ogranicza wzajemne mieszanie się ze sobą dwóch strumieni (wznoszącego i opadającego). Zmniejsza to efekt tarcia pomiędzy nimi. Mniejsza burzliwość przepływu pozwala uzyskać mniejszą wartość spadku ciśnienia.

Analizując drugi parametr sprawności, bardziej istotny w przypadku cyklonów stosowanych w procesie wypału klinkieru – skuteczność odpylania fazy stałej zauważono, że dla wylotu w kształcie walca odnotowano znaczne zmniejszenie jego wartości. Wynika to faktu, że wraz ze zmniejszeniem prędkości lokalnych gazu zwiększa się tendencja do odbijania się cząstek mąki piecowej od ścianek odpylacza. Powoduje to wzrost zasysania nieosadzonych cząstek przez wznoszący strumień wylotowy. Wylot w kształcie stożka pozwala ograniczyć to zjawisko, niestety kosztem wzrostu wartości spadku ciśnienia.



Rys. 8. Porównanie lokalnych prędkości w okolicach dolnej części wylotu; dla wylotu w kształcie stożka (a) oraz walca (b)

WNIOSKI

Przeprowadzona analiza zjawiska przepływu mieszaniny gazów i mąki piecowej w okolicach wylotu z cyklonu potwierdziła skuteczność metod badawczych opartych na CFD w modelowaniu przepływów heterogenicznych w cyklonach. Opracowany model numeryczny uzyskał dużą zgodność obliczeniową z wynikami pomiarowymi, co umożliwia przeprowadzenie obliczeń przy zmiennych warunkach pracy. Model numeryczny nieznacznie zaniżał zarówno wartości spadków ciśnienia, jak i skuteczności odpylania. Średnia rozbieżność wyników w przypadku spadku ciśnienia wynosiła ok. 9%, a skuteczności odpylania ok. 6%.

Zastosowane narzędzie software'owe – pakiet ANSYS Fluent – okazało się skuteczne w zrozumieniu istoty problemu oraz badaniu wzajemnych zależności pomiędzy parametrami występującymi w danej symulacji.

Uzyskane wyniki na podstawie badań doświadczalnych oraz obliczeń numerycznych pozwalają stwierdzić, że wprowadzenie nawet prostych technicznie i niskich kosztowo zmian może prowadzić do poprawy skuteczności pracy cyklonów pierwszego stopnia, co docelowo prowadzi do poprawy sprawności procesu wypału klinkieru. Zmiany te poprawiają rozkład pól prędkości w separatorze.

Streszczenie

W artykule zbadano wpływ ukształtowania wylotu z cyklonu I stopnia na skuteczność pracy tego aparatu. Badania zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu dwóch metod badawczych. Pierwsza z nich polegała na wykorzystaniu modelowania numerycznego przepływów (pakiet ANSYS FLUENT). W obliczeniach zastosowano model turbulencji Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations (RANS) oraz model domykającym Reynolds Stress Model (RSM). Obecność mąki piecowej została odwzorowana za pomocą metody Eulera-Lagrange'a realizowanej jako model dyskretny fazy DiscretePhase Model (DPM). Druga metoda związana była z zaprojektowaniem instalacji doświadczalnej i przeprowadzeniu serii badań eksperymentalnych. Przeprowadzona walidacja uzyskanych wyników na podstawie dwóch metod wskazała na dużą ich zgodność. Rezultaty badań pozwalają stwierdzić, że wprowadzenie nawet prostych technicznie i niskich kosztowo zmian może prowadzić do poprawy skuteczności pracy cyklonów pierwszego stopnia instalacji wypalania klinkieru.

Influence shape of inlet diptube on efficiency work first stage the suspension preheater

Abstract

This paper examined influence of various configurations of outlet from the 1st stage cyclone on efficiency of operation of this apparatus. Research has been carried out using two research methods. The first one was based on use of Computational Fluid Dynamics (ANSYS FLUENT package). Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations (RANS) turbulence model and Reynolds Stress Model (RSM) have been used for calculations. Presence of kiln hot meal has been represented using Euler-Lagrange equation implemented as a DiscretePhase Model (DPM). The second method was connected with designing of the pilot plant and carrying out series of experimental studies. Validation of obtained results based on the two methods indicated their conformity. The results demonstrated that even introduction technically simple and low-cost modifications can lead to improvement of efficiency of operation of the 1st stag cyclones in the system intended for burning of clinker.

BIBLIOGRAFIA

1. Duda J.; Energooszczędne i proekologiczne techniki wypalania klinkieru cementowego. Prace IMMB, 2004, Opole.
2. Wasilewski M., Duda J.: Application of Computational Fluid Dynamics to optimization of cyclone dust separators operated in the cement industry, Chemik 2013, 67, 10, s. 985-994.
3. Wasilewski M., Duda J.: Wpływ modernizacji cyklonowych wymienników ciepła na energochłonność procesu wytwarzania cementu. Prace ICiMB nr 11, s. 20-29.
4. Dokument Referencyjny dla najlepszych dostępnych technik w przemyśle cementowo-wapienniczym. Warszawa, 2010.
5. Muschelknautz E., Kambrock, W.: Aerodynamischebeiwerte des zyclonabscheidersaufgrundneuerundverbessertermessungen. Chemie Ingenieur Technik, vol. 42, 1970, pp. 247-255.
6. Muschelknautz E.: Dieberechnung von zyklonabscheidern fur gas. Chemie Ingenieur Technik, vol. 44, 1972, pp. 63-71.
7. Muschelknautz E., Trefz M.: Design and calculation of higher and highest loaded gas cyclones. In: Proceedings of Second World Congress on Particle Technology, Kyoto, Japan, 1990, pp. 52-71.
8. Fluid Dynamics Analysis Package; Theory Manual revision 8.0.
9. Fluid Dynamics International, Incorporated, 1999.
10. Plutecki Z.: Analiza wpływu mikroklimatu na emisję wyładowań niezupełnych maszyn elektrycznych. Politechnika Opolska, Studia i Monografie z. 325, Opole 2012.
11. ANSYS FLUENT Theory Guide 14.0, November 2011.