

---

**PRACE**

**Instytutu Ceramiki  
i Materiałów Budowlanych**

---

***Scientific Works***  
of Institute of Ceramics  
and Building Materials

---

**Nr 11**

ISSN 1899-3230

**Rok V**

**Warszawa–Opole 2012**

---

*JERZY DUDA\**

*MAREK WASILEWSKI\*\**

# **Wpływ modernizacji cyklonowych wymienników ciepła na energochłonność procesu wypalania klinkieru**

**Słowa kluczowe:** cyklonowe wymienniki ciepła, odpylanie, energochłonność.

Nowe techniki wypalania klinkieru w piecach obrotowych z układami wstępnej dekarbonizacji wymagają zastosowania nowych, charakteryzujących się niższymi oporami hydraulicznymi i wyższymi sprawnościami odpylającymi, konstrukcji wymienników cyklonowych. W pracy zostały przedstawione przykładowe sposoby modernizacji konstrukcji cyklonowych wymienników ciepła. Dokonano także analizy wpływu tych zmian na zmniejszenie zużycia energii w procesie wypalania klinkieru.

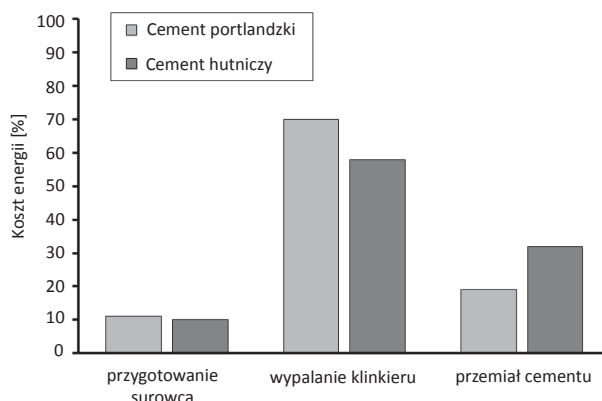
## **1. Wstęp**

W przemyśle cementowym priorytetem, zgodnie z zasadą zrównoważonego rozwoju, jest: obniżenie energochłonności wytwarzania cementu, zwiększenie udziału w procesie produkcyjnym paliw i surowców odpadowych oraz ograniczenie szkodliwego oddziaływania na środowisko. Energochłonność (koszty produkcji) wytwarzania cementu zależy głównie od trzech podstawowych procesów: przygotowania surowca, wypalania klinkieru oraz przemiału cementu. Na rycinie 1 przedstawiono wpływ poszczególnych procesów na koszt energii.

---

\* Dr hab. inż., prof. PO, Politechnika Opolska.

\*\* Mgr inż., Politechnika Opolska.



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 1. Udział kosztów energii w poszczególnych etapach produkcji [4]

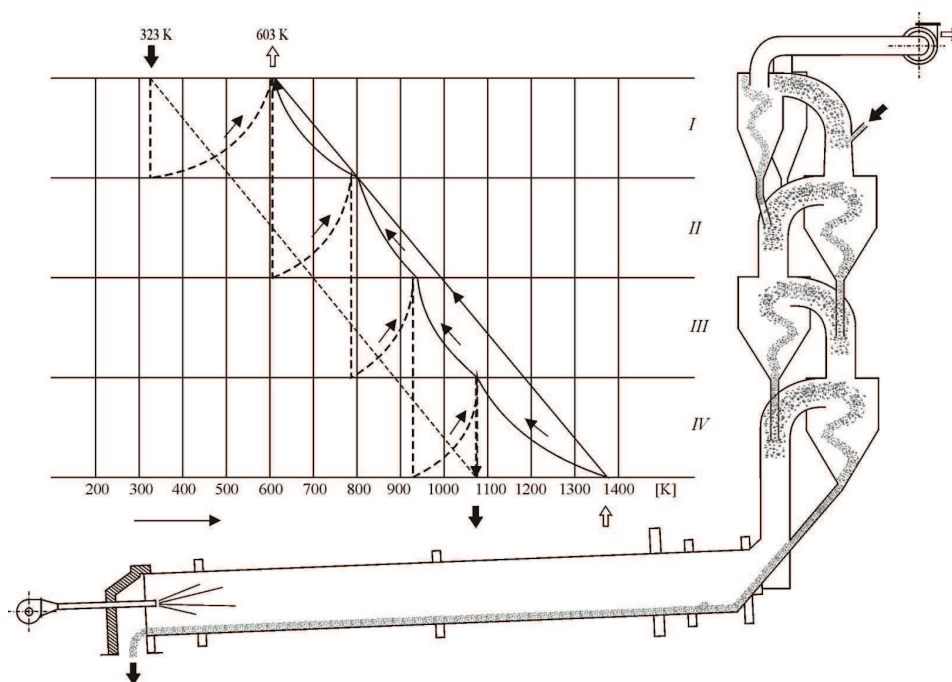
Zdecydowanie najbardziej energochłonnym procesem jest wypalanie klinkieru (ponad 50% kosztów). Dodatkowo proces ten jest bardzo istotny ze względu na jakość produktu oraz potencjalne emisje substancji szkodliwych dla środowiska. W związku z tym działania zmierzające do usprawnienia procesu wypalania należą w cementowni do podstawowych i są ciągle aktualne. Duży wpływ na ekonomię suchej metody produkcji cementu wywarło zastosowanie w piecu obrotowym zewnętrznego cyklonowego wymiennika ciepła i układu wstępnej dekarbonizacji.

Geneza powstania tych wymienników ciepła sięga 1932 r., kiedy to inż. Mikael Vogel-Jorgensen opatentował w Pradze cyklonowy wymiennik ciepła dla podgrzewania mąki surowcowej pt. „Sposób i urządzenie do zasilania pieca obrotowego drobno zdyspergowanym materiałem”. Jednak dopiero po 20 latach system ten doczekał się technicznego opracowania i zastosowania w przemyśle cementowym przez firmę KHD Humboldt [1]. Od tego momentu przedsiębiorstwa zajmujące się produkcją urządzeń dla cementowni stosują zewnętrzne wymienniki ciepła w oparciu o wielostopniowe wymienniki cyklonowe. W dzisiejszych czasach jednym z kierunków poprawy sprawności cieplnej procesu wypału klinkieru jest optymalizacja cyklonowego wymiennika ciepła. Jego sprawność (odpyleniowa oraz termiczna) zależy w dużym stopniu od konstrukcji stosowanych cyklonów, ilości stopni i ma znaczący wpływ na sprawność energetyczną pieca. W związku z tym poszukuje się nowych innowacyjnych konstrukcji cyklonów, które charakteryzują się niższymi stratami hydraulicznymi i wyższą sprawnością. Modernizacja istniejących wymienników wiąże się z dużymi stratami finansowymi wynikającymi z konieczności zatrzymania pieca na dłuższy okres (strata produkcji) oraz wysokimi kosztami inwestycyjnymi [2]. Dlatego

poszukuje się alternatywnych jak najprostszych rozwiązań usprawniających pracę wymiennika przy minimalnym czasie wyłączenia pieca z produkcji.

## 2. Konstrukcja oraz zasada działania cyklonowych wymienników ciepła

Na rycinie 2 przedstawiono typowy cyklonowy wymiennik ciepła. Składa się on z cyklonów (najczęściej z 4 stopni, numerowanych kolejno, licząc od góry, od I do IV) oraz z przewodów górných i przewodów transportujących mąkę surowcową. Spaliny (o temperaturze 1000–1100°C) powstające podczas spalania paliwa w piecu obrotowym przewodem – rurą wzniosową – doprowadzone zostają do dolnego cyklonu (stopnia IV), skąd kierowane są kolejno do następnych stopni, przepływając w górę wymiennika. Z kolei mąka surowcowa dostarczana jest do przewodu łączącego cyklon II stopnia z cyklonem I stopnia. Wskutek dużej prędkości (15–20 m/s) górných w przewodzie łączącym cyklony, mąka jest porwana i trafiła do cyklonu I stopnia, gdzie następuje pierwszy etap jej podgrzania, wydzielenie ze strumienia górných. Po separacji trafiła do rur spustowych (opadających), następnie przez wznoszące przewody górných trafiła do cyklonu II stopnia. Proces ten jest powtarzany w kolejnych cyklonach, aż do przewodu spustowego cyklonu IV stopnia, skąd mączka dostaje się do pieca obrotowego.



Ryc. 2. Zasadnicze działania i rozkład temperatur w cyklonowym wymienniku ciepła [1]

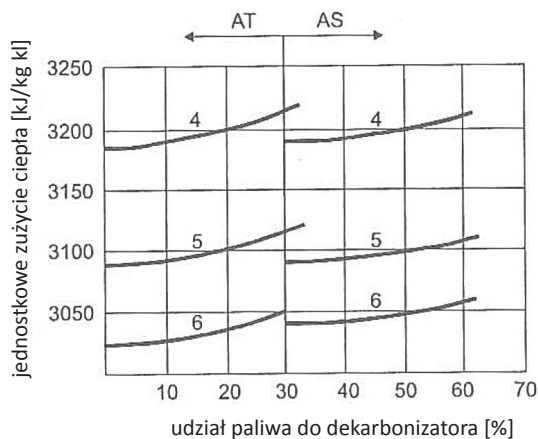
Praca cyklonowego wymiennika ciepła zbliżona jest do pracy kłasicznych wymienników ciepła w stałym wieszaniu. Mączka surowcowa, przepływając przez kolejne stopnie cyklonów, ogrzewana jest spiralnymi przepływającymi w kierunku przeciwnym do kierunku materiału. Proces wymiany ciepła w wymienniku cyklonowym pomiędzy spiralnymi kanałami surowcową przebiega zarówno przeciwnieprądowo, jak i współprądowo. W tych warunkach następuje intensywne wymienniki ciepła, a mączka po cyklonie IV stopnia wchodzi do pieca osiągnąć temperaturę ok. 815–825°C (przy początkowej 50°C i reakcji endotermicznej). Czas przejścia cząstki w czterostopniowym wymienniku ciepła (o wysokości ok. 60 m) wynosi ok. 25 s, a temperatura gazów odlotowych obniża się z 1000–1100°C do 330–350°C [4].

Konstrukcje cyklonów poszczególnych stopni wymiennika ciepła wynikają z warunków temperaturowych oraz z ich funkcji. Wysokości cylindrycznych części cyklonów II, III i IV stopnia nie są duże. Wynika to z faktu, że w tych poziomach mniejsze znaczenie ma stopień separacji (ok. 70–80%). W niższym celem dla tych cyklonów jest zwiększenie sprawności cieplnej, ograniczenie strata ciśnienia oraz wymiarów wieży wymiennikowej. Natomiast cyklony z wysoką sprawnością separacji cząstek znajdują się stosownie na najwyższym I stopniu, gdzie wymaganie jest separacji > 95%. W niższych stopniach wymiennika trudno jest zapewnić wysoką sprawność separacji cząstek ze względu na postępujące rozdrobnienie cząstek (dekarbonizacji) oraz małą gęstość gazów (wysoka temperatura).

### 3. Wybrane przykłady modernizacji cyklonowych wymienników ciepła

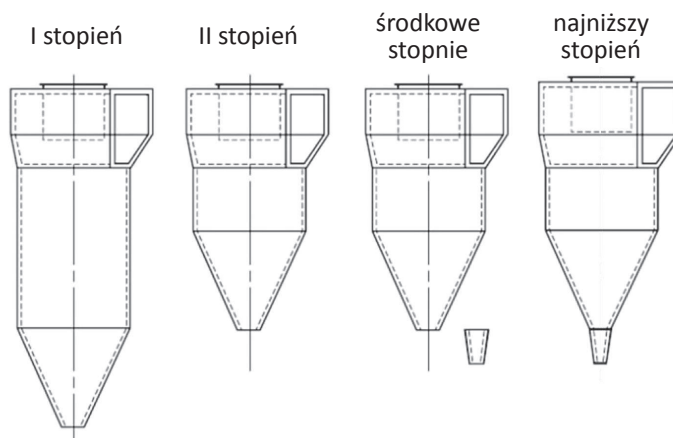
Nowe techniki wypleniły w piecach z układowi wstępnej dekarbonizacji spowodowały rozbudowę typowego 4-stopniowego wymiennika cyklonowego o dodatkowy 5 i często nawet 6 stopień. Wynikają to z stosowaniem nowych, charakteryzujących się niższymi oporami hydraulicznymi i wyższymi sprawnościami odpylającymi, konstrukcji wymienników cyklonowych. Wielkość strat cieplnych zależy od liczby stopni waha się od 0,75 do 1,25 MJ/kg kł.

Na rycinie 3 przedstawiono wpływ liczby stopni wymiennika na zużycie ciepła dla różnych systemów wstępnej dekarbonizacji i udziału paliwa w dekarbonizatorze [2]. Jak widzieć, stosowanie wymiennika 6-stopniowego w miejsce 4-stopniowego pozwoli zmniejszyć zużycie ciepła o ok. 200 kJ/kg kł [2], tj. do poziomu 2930 kJ/kg kł.



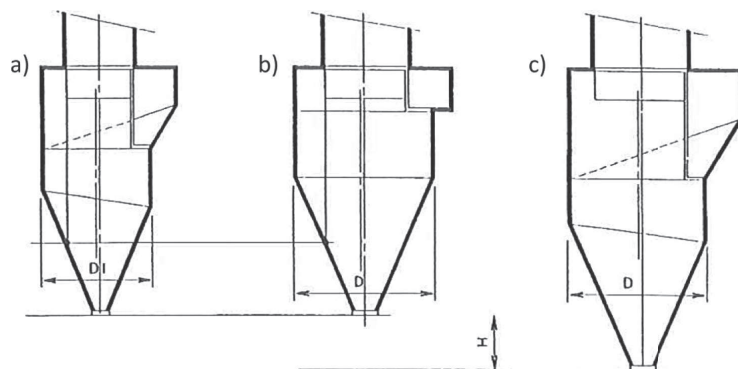
Ryc. 3. Wpływ liczby stopni wymiennika cyklonowego na zużycie ciepła dla różnych systemów wstępnej dekarbonizacji (AT – powietrze przez piec, AS – z trzecim powietrzem) [2]

Oprócz zwiększenia liczby stopni wieży wymiennikowej, bardzo istotnymi parametrami są wymiary oraz kształty cyklonów poszczególnych stopni. Cyklony I stopnia powinny charakteryzować się dużą zdolnością do odpylania (stąd większe wysokości części cylindrycznej), natomiast cyklony niższych stopni powinny charakteryzować się małymi wymiarami w celu ograniczenia strat ciśnienia. Dodatkowo winny być wykonane z materiałów odpornych na działanie wysokiej temperatury oraz związków agresywnych chemicznie. Na rycinie 4 pokazano przykładowe konfiguracje cyklonów poszczególnych stopni stosowanych obecnie w przemyśle cementowym [3].



Rys. 4. Charakterystyka wymiarów poszczególnych stopni cyklonowych wymienników ciepła [3]

Kolejnymi czynnikami wpływającymi w dużym stopniu na pracę wymiennika w urządzeniach linii piecowych, stosowanych w procesie wypalania klinkieru, są wymiary oraz kształty wlotów do cyklonów. W przeszłości stosowano wloty o przekroju prostokątnym lub kwadratowym. Obecnie odchodzi się od takiego rozwiązania i stosuje się wloty przewężające się w dolnej części [4]. Prowadzi to do zmniejszenia efektu osadzania się cząstek w tej części cyklonu poprzez zwiększenie prędkości przepływu. Porównanie pod względem rozmiaru i geometrii nowego wlotu cyklonu (a) z konwencjonalnym (b) zaprezentowano na rycinie 5. Punkt c na rycinie 5 przedstawia możliwość modyfikacji cyklonów starszej konstrukcji do nowej geometrii, polegającej na zmianie kształtu i wielkości wlotu do cyklonu oraz części cylindrycznej. Badania porównawcze przeprowadzone przez firmę Technip CLE wykazały następujące spadki ciśnienia: wariant „a” – 550 Pa, „b” – 700 Pa, „c” – 550 Pa [5]. Wynika z tego, że istnieje możliwość zmniejszenia spadku ciśnienia w cyklonie przy stosunkowo niskich kosztach związanych z modernizacją, gdyż nie trzeba kupować zupełnie nowych cyklonów.

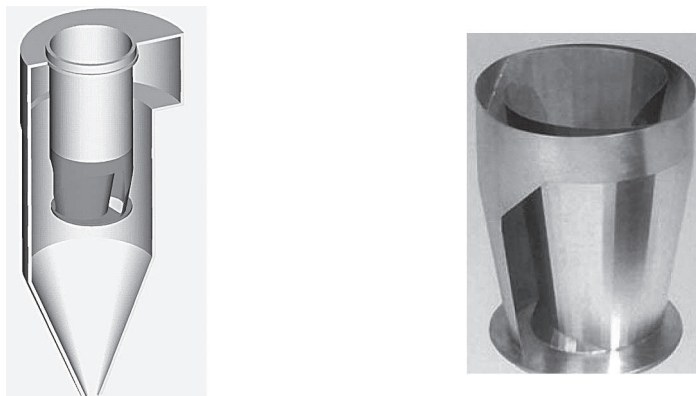


Rys. 5. Przykłady zmian przekroju wlotu zaproponowanych przez firmę Technip CLE [5]

Innymi ciekawymi rozwiązaniami wpływającymi na zwiększenie efektywności procesu wytwarzania klinkieru, przy jednoczesnym zmniejszeniu jego energochłonności, są rozwiązania zaproponowane przez firmę A TEC. Zakład ten opracował i wdrożył, przy współpracy z innymi partnerami, kompleksowe rozwiązanie modernizacyjne cyklonów, polegające na zastosowaniu tzw. wirujących łopatek (technologia Hurrivane) oraz dwóch rur nurnikowych (technologia Hurriclone). Rozwiązania te mogą być stosowane równolegle oraz każde osobno. Dobór ich jest uzależniony od specyfiki i warunków każdej z modernizowanych instalacji.

„Wirujące łopatki” stanowią rurę (z elementem walcowym i stożkowym – ryc. 6), której zadaniem jest odpowiednie skierowanie strugi gazu do rurki „nurnikowej” – wytworzenie korzystnej ścieżki przepływu spalin. Pozwala to

ograniczyć przede wszystkim straty ciśnienia przy wylocie z cyklonów, gdzie ze względu na wysokie prędkości przepływu (mniejsza średnica) odnotowuje się największe straty ciśnienia.



Ryc. 6. Technologia Hurrivane zaproponowana przez firmę A TEC [7]

W tabeli 1 przedstawiono wyniki modernizacji polegającej na zastosowaniu technologii Hurrivane [6, 9]. Wdrażając te rozwiązania zanotowano spadek strat ciśnienia od 41 do 53%. Dzięki temu w zależności od linii produkcyjnej zaoszczędzono (dla trzech przykładowych cementowni w Niemczech i jednej w Czechach) od 350 000 kWh do 1 600 000 kWh na rok. Z kolei w Cementowni Cementos E-Yeles w Hiszpanii oraz Cementowni Mokra Plant w Czechach została także zwiększona wydajność produkcyjna o ok. 18%. Obecnie na świecie funkcjonuje ponad 350 instalacji wyposażonych w technologię Hurrivane.

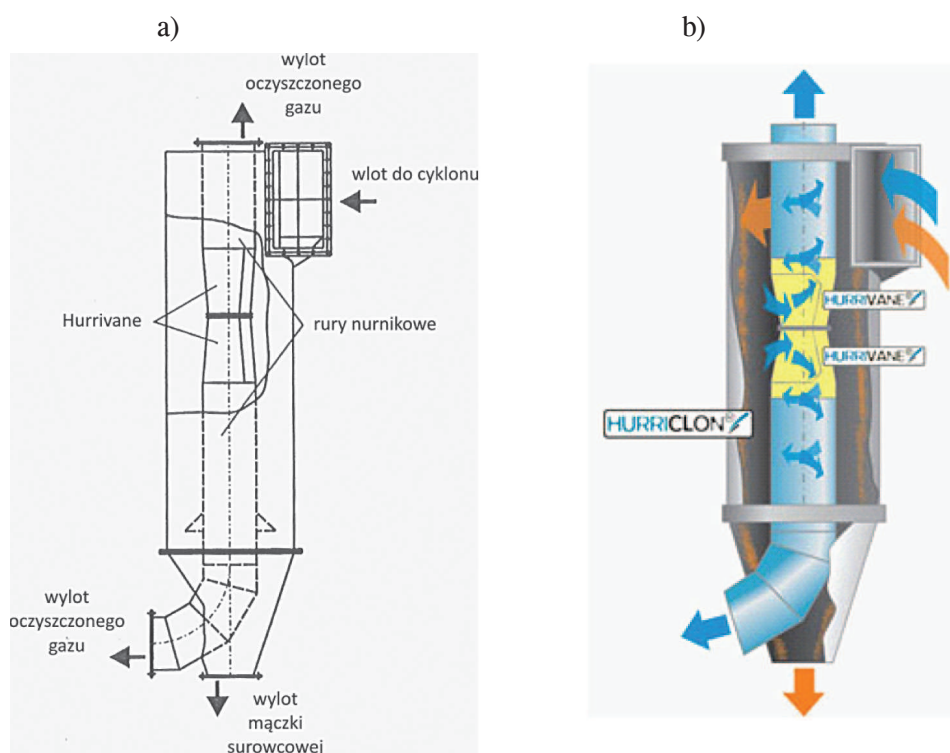
T a b e l a 1

*Rezultaty zastosowania technologii Hurrivane [9]*

Cementownia	Przed modernizacją	Po modernizacji	Rezultaty	
	strata ciśnienia [Pa]		strata ciśnienia [%]	oszczędność energii w ciągu roku [kWh]
Gollheim (1)	1 200	700	-41	350 000
Gollheim (2)	3 000	1 400	-53	1 600 000
Mannersdorf	1 400	700	-50	750 000
Cementos E-Yeles	1 600	900	-44	-
	wydajność [t/d]		wydajność [%]	-
Cementos E-Yeles	1 344	1 584	18	-
Ceskomoravsky Cement, Mokra	1 700	2 000	18	648 000



Drugą technologią opracowaną przez firmę A TEC jest technologia Hurriclon (ryc. 7). Hurriclon jest specjalnie zaprojektowanym cyklonem z dwoma rurami „nurnikowymi” zamiast jednej (dwa króćce wylotowe oczyszczonego gazu) [7]. Jedna znajduje się w górnej części cyklonu (konwencjonalne rozwiązanie), natomiast druga w dolnej części cyklonu. Dodatkowo na wlotach do tych rur zainstalowano „wirujące łopatki” – Hurrivane. Dzięki zastosowaniu tej metody możemy uzyskać mniejszą stratę ciśnienia w dolnej części cyklonu. Dzięki zmniejszeniu strat ciśnienia możliwe jest zaprojektowanie mniejszej średnicy zewnętrznej i otrzymanie większej prędkości. Rezultatem tego działania jest większa skuteczność separacji cząstek.



Ryc. 7. Technologia Hurriclon [7]

Zależnie od wielkości cząstki, ilości gazu i ładunku pyłu, Hurriclon jest w stanie osiągnąć skuteczność odpylania do 99% (dla cząstek między 10  $\mu\text{m}$  i 30  $\mu\text{m}$ ) [7]. W porównaniu ze standardowymi cyklonami, Hurriclon wymaga mniej przestrzeni, dlatego też koszty inwestycji są niższe. Do roku 2010 zainstalowano na świecie ok. 400 tego typu cyklonów, począwszy od przemysłu drzewnego, przez cukierniczy, po przemysł cementowy. Właśnie w tym ostatnim pracuje zdecydowana większość cyklonów tej konstrukcji.

Efekty wdrożenia czterech cyklonów typu Hurriclon w jednej z cementowni (cementownia Rioclaro) zaprezentowano w tabeli 2 [8]. W zakładzie tym funkcjonują 2 linie do wypału klinkieru o wydajności 1700 t/d oraz 2100 t/d. Modernizacja poddano linię z 5-stopniowym cyklonowym wymiennikiem ciepła o wydajności 2100 t/d.

Tabela 2

*Rezultaty wdrożenia technologii Hurriclon w cementowni Rioclaro [8]*

Wskaźniki	Przed modernizacją	Po modernizacji
Skuteczność separacji	50,3%	99%
Emisja pyłu	550 kg/h	45 kg/h
Strata ciśnienia	750 Pa	580 Pa
Produkcja	2100 t/dobę	2115 t/dobę

Sprawność separacji cząstek zwiększyła się z 50 do 99%. Jednakże należy zaznaczyć, iż taką skuteczność uzyskano dla cząstek większych niż 10  $\mu\text{m}$ . Wynikiem tego jest obniżenie emisji pyłowej z 550 kg/h do 45 kg/h. Zanotowano także spadek straty ciśnienia o 170 Pa oraz wzrost zdolności produkcyjnych o ok. 15 ton na dobę. Dzięki uzyskanym efektom modernizacji wymiennika cyklonowego, zdecydowano się na instalację kolejnych cyklonów Hurriclon w siedmiu innych liniach produkcyjnych w cementowniach należących do tej firmy.

Kolejnym przykładem zastosowania tych cyklonów jest cementownia Cimpor Alhandra w Portugalii. Przed modernizacją straty ciśnienia wynosiły 1700 Pa, a wydajność 2900 ton na dobę. W wyniku zainstalowania 2 cyklonów Hurriclon zanotowano stratę ciśnienia do 910 Pa (producent cyklonów gwarantował maksymalną stratę ciśnienia – ok. 1000 Pa), a wydajność zwiększyła się o 347 t/d (producent cyklonów gwarantował minimalny wzrost – 200 t/d). Skuteczność separacji cząstek wynosiła 93% [9].

## 4. Podsumowanie

Cyklonowy wielostopniowy wymiennik ciepła jest najczęściej stosowanym urządzeniem w nowoczesnych piecach obrotowych pracujących metodą suchą. Dążenie do obniżenia strat cieplnych w procesie wypalania klinkieru poprzez rozbudowę wymiennika ciepła o kolejny 5 lub 6 stopień cyklonów wymaga opracowania nowych, o niższych stratach hydraulicznych, konstrukcji cyklonów. Znaczne efekty energetyczne i ekonomiczne można uzyskać modernizując istniejące konstrukcje wymienników cyklonowych, które charakteryzują się dużymi oporami hydraulicznymi i niskimi sprawnościami. Wprowadzenie nawet prostych technicznie i niskich kosztowo zmian może wpływać na poprawę pracy tych urządzeń, a ostatecznie zmniejszyć energochłonność całego procesu produkcji cementu.

Usprawnienia te mogą dotyczyć przede wszystkim wlotów do cyklonów, wlotów do rury nurnikowej, poziomego zanurzenia rury nurnikowej, odpowiedniego zaprojektowania miejsca doprowadzenia mączki (w celu właściwej dystrybucji mączki do pionowego strumienia gazu), zmiany kąta wprowadzenia mączki surowcowej do cyklonu, czy też zmiany liczby stopni cyklonów w wieży wymiennikowej.

## Literatura

- [1] D u d a W., *Cement Data Book*, Vol. 2, Wiesbaden 1977.
- [2] Polysius Cement, Report 1993, No. 4.
- [3] B e c h C., M i s h u l o v i c h A., Preheaters and Precalciners, [www.scribd.com](http://www.scribd.com) (28.04.2012).
- [4] D u d a J., *Energooszczędne i proekologiczne techniki wypalania klinkieru cementowego*, „Prace Instytutu Mineralnych Materiałów Budowlanych w Opolu” 2004, wyd. spec.
- [5] R h i n C., *Making the grade in burning lines through modernisation and upgrading*, „Ciments, Betons, Platres, Chaux” 2001, No. 849.
- [6] S c h w a i g e r G., *Pressure loss reductions and energy saving with a Vortex finder vanes system*, „World Cement” 1997, October.
- [7] S c h w a i g e r G., *Pressure loss reductions and energy saving created by insertion of vortex finder vanes into preheater and grinding circuit cyclones, and installation of Hurriclon cyclones*, [w:] *Europe Cement Conference, march 1999*, Berlin 1999.
- [8] R e i n t h e r G., *Latin cyclones*, „International Cement Review” 2001, October.
- [9] A T E C, Preheater optimization in the cement industry, 2006, [www.uaacement.com](http://www.uaacement.com) (28.04.2012).

JERZY DUDA  
MAREK WASILEWSKI

### THE INFLUENCE OF SUSPENSION PREHEATERS MODERNIZATION ON THE ENERGY CONSUMPTION DURING CEMENT MANUFACTURING PROCESS

**Keywords:** cyclone heat exchangers, dedusting, energy consumption.

New techniques of clinker burning require utilization of a new suspension preheaters design characterized by a lower hydraulic resistance and higher efficiency de-dusting. In this paper, examples of ways to modernize the structure of suspension preheaters were presented. An analysis of the influence of those changes on reduction of energy consumption during cement manufacturing process was also conducted.