

# Nowoczesne palniki cyklonowe dla zwiększenia elastyczności kotłów pyłowych

## Modern cyclone burners for the increase of operational flexibility of pulverized-fuel boilers

ROBERT ZARZYCKI  
RAFAŁ KOBYŁECKI  
ZBIGNIEW BIS\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.2.32>

W pracy przedstawiono koncepcję oraz pilotowy model palnika cyklonowego, pozwalający na realizację procesu spalania oraz zgazowania paliw stałych (np. pyłu węglowego). Palnik może zarówno stanowić odrębną konstrukcję, jak i być elementem zintegrowanym z pracującym kotłem pyłowym. W tym drugim przypadku zabudowa palnika cyklonowego umożliwia: zwiększenie elastyczności i dynamiki pracy bloku, wzrost wydajności cieplnej kotła, obniżenie minimum technologicznego pracy bloku bez konieczności uruchamiania palników rozpałkowych w kotle, a także realizację procesu obróbki termicznej bądź witrifikacji ubocznych produktów spalania paliw. Proponowane rozwiązanie może stanowić interesującą opcję technologiczną, ukierunkowaną na retrofitting i modernizację bloków pyłowych klasy 200 MW w ramach Programu Ramowego „Energetyka 200+. Rewitalizacja i odbudowa mocy na bazie bloków 200 MW”.  
**SŁOWA KLUCZOWE:** palnik cyklonowy, spalanie, zgazowanie, kocioł pyłowy, minimum techniczne kotła

*In this paper, the concept, as well as a model pilot cyclone burner are presented and discussed in order to provide a solution for both combustion and gasification of solid fuels (e.g. pulverized coal). The burner design allows to operate it as a separate structure or a part of an existing pulverized-fuel boiler. In the latter case, the cyclone burner increases the flexibility and dynamics of the power generation system, as well as boiler thermal output. The burner also provides the conditions for the reduction of boiler technological minimum without the necessity to ignite boiler startup burners, and also enables the realization of treatment and processing (e.g. the vitrification) of coal combustion by-products. The proposed solution can also become an interesting technological option aimed at the retrofitting and modernization of old 200 MW PC-based power generation facilities within the Framework Program “Power 200+. Revitalization and restoration of power on the basis of 200 MW power units”.  
**KEYWORDS:** cyclone furnace, combustion gasification, PC boiler, minimum boiler load*

W wielu krajach, w tym w Polsce, podstawą wytwarzania energii elektrycznej oraz ciepła są procesy spalania paliw kopalnych, głównie węgla kamiennego i brunatnego. W procesach spalania tych paliw największy nacisk kładzie się na zwiększanie mocy jednostek wytwórczych, a jednocześnie na ciągłe podwyższanie ich sprawności i dyspozycyjności oraz spełnianie rosnących wymagań dotyczących ochrony środowiska [1, 2]. W związku z tym na przestrzeni lat powstało wiele konstrukcji kotłów (rusztowych, pyłowych oraz fluidalnych), z których większość stanowi podstawę Krajowego Systemu Energetycznego (KSE). Jednostki te pełnią rolę podstawowych źródeł mocy, muszą jednak mieć szerokie możliwości zmian obciążenia, wynikające z aktualnego zapotrzebowania

KSE [3]. Dotychczas pracujące jednostki wytwórcze cechują się minimum technicznym na poziomie ok. 40% mocy nominalnej i muszą zapewnić wymaganą elastyczność zmian obciążenia na poziomie 4% zmiany mocy nominalnej na minutę.

Energetyka zawodowa oparta na wykorzystaniu paliw kopalnych jest jednak głównym emitentem zanieczyszczeń oraz gazów cieplarnianych do atmosfery. Pomimo wdrożenia wielu technologii ograniczających negatywny wpływ energetyki na środowisko – tj. odpylania spalin (elektrofiltrów, filtrów workowych, cyklonów), odsiarczania spalin (metod mokrych, suchych i półsuchych), odazotowania spalin (SNCR, SCR, metod pierwotnych ograniczania emisji NOx) – wiele kwestii wymaga dalszych prac, gdyż do tej pory nie udało się np. znacząco ograniczyć emisji CO<sub>2</sub>.

Unia Europejska nakłada na kraje w niej zrzeszone konieczność ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> oraz zwiększenia stopnia wykorzystania odnawialnych źródeł energii w procesach wytwarzania energii elektrycznej oraz ciepła. Aby to zapewnić, w ostatnich latach rozwijane było m.in. współspalanie biomasy w kotłach energetycznych – w efekcie powstało szereg bloków zasilanych jedynie tym paliwem.

Udział odnawialnych źródeł energii w zapewnieniu mocy w KSE niewątpliwie przyczynia się do ograniczenia zużycia paliw kopalnych i tym samym do zmniejszenia emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery. Z drugiej jednak strony – ze względu na stochastyczny charakter pracy (dostarczania mocy) źródeł bazujących na wietrze i stanowiących znaczącą część polskiego systemu energetycznego – utrzymanie zakładanego miksu energetycznego wymaga od bloków opalanych węglem kamiennym i brunatnym możliwości szybkiego dostosowania ich do bieżących potrzeb i niezwłocznego dostarczenia mocy w przypadku zmiany warunków atmosferycznych wpływających na prędkość wiatru itp. Jest to istotne zwłaszcza wtedy, gdy zapotrzebowanie KSE jest niskie (obecnie w Polsce jest ono rzędu kilkunastu GW), a znaczącą część energii wytwarzają turbiny wiatrowe. W takich przypadkach konwencjonalne bloki energetyczne muszą, niestety, pracować z mocą minimalną i wymagają stabilizowania z wykorzystaniem palników rozpałkowych opalanych drogiem gazem lub lekkim olejem opałowym. W skrajnych przypadkach może nawet nastąpić krótkookresowe odstawienie bloku, a następnie jego rozruch z użyciem kosztownego paliwa.

Rozwiązaniem tego problemu, pozwalającym na znaczące ograniczenie ilości zużywanego paliwa rozruchowego (podtrzymującego), może być zaproponowane w niniejszym artykule zabudowanie w układzie istniejącego kotła pyłowego palnika cyklonowego (lub grupy palników) zasilanego pyłem węglowym, pozwalającego na utrzymanie kotła w stanie gorącej rezerwy bez spalania gazu lub oleju opałowego. Takie podejście niewątpliwie poprawi też ekonomikę działań ukierunkowanych na modernizację istniejących bloków energetycznych z kotłami pyłowymi, przedstawianych np. w ramach programu 200+.

\* Dr inż. Robert Zarzycki (zarzycki@is.pcz.pl), dr hab. inż. Rafał Kobylęcki prof. PCz (rafalk@is.pcz.pl), prof. dr hab. inż. Zbigniew Bis (zbis@is.pcz.pl) – Katedra Inżynierii Energii, Politechnika Częstochowska

## Idea palnika cyklonowego

Zaproponowany przez autorów palnik cyklonowy stanowi urządzenie energetyczne, w którym w silnie zawirowanym strumieniu gazu można realizować proces spalania lub zgazowania paliwa. Palniki cyklonowe pozwalają na spalanie paliw gazowych i ciekłych, jednakże największy przewidywany potencjał osiągają w zastosowaniu jako reaktory strumieniowe/dyspersyjne do zgazowania paliw stałych. Możliwe jest współspalanie/zgazowanie w nich paliw o niskich wartościach opałowych oraz wysokiej zawartości popiołu. Palniki tego typu charakteryzują się wysokim obciążeniem cieplnym oraz wysoką temperaturą pracy, co z jednej strony jest zaletą, ponieważ pozwala na wykorzystywanie paliw o niskiej wartości opałowej oraz odprowadzanie popiołu w postaci płynnego żużla, a z drugiej – wadą, gdyż wysoka temperatura procesu może skutkować podwyższoną emisją  $\text{NO}_x$  w gazach odlotowych. Rozwiązaniem problemu wysokiej emisji  $\text{NO}_x$  może być zastąpienie powietrza (czynnika roboczego i medium utleniającego) mieszaniną recykulowanych spalin o kontrolowanym stężeniu tlenu. Takie rozwiązanie dodatkowo wpisuje się w szeroko promowaną i rozwijaną ostatnio technologię oksyspalania.

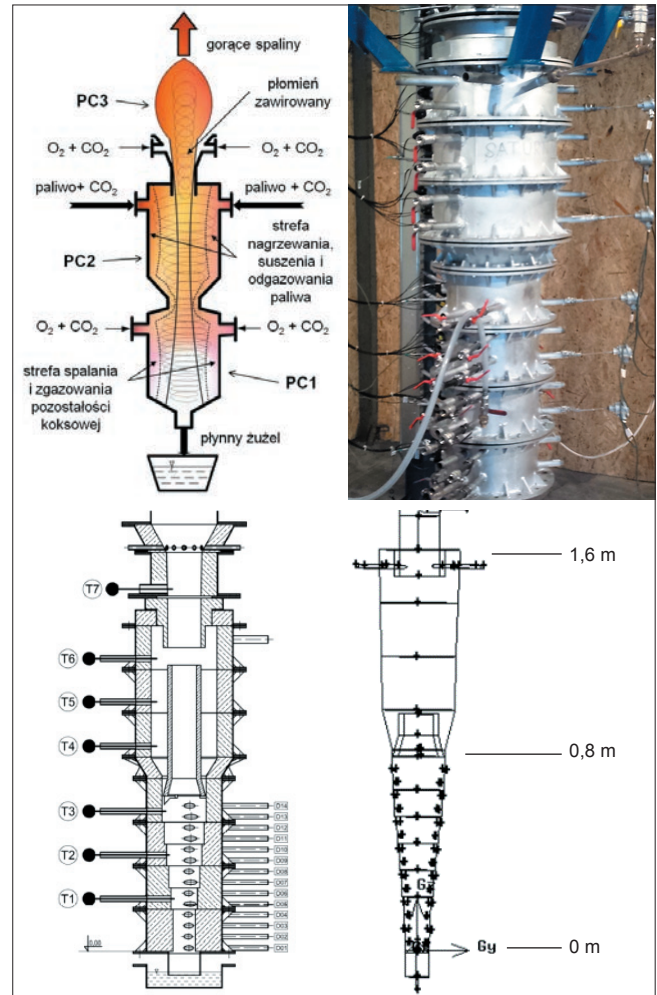
Prezentowany w niniejszym artykule palnik cyklonowy opracowano w Katedrze Inżynierii Energii Politechniki Częstochowskiej [4]. Składa się on z dwóch komór (rys. 1): górnej (PC2) i dolnej (PC1). Komora PC2 ma kształt walca. W jej górnej części znajdują się stycznie zabudowane kanały służące do pneumatycznego podawania rozdrobnionego paliwa oraz nurnik mający za zadanie ograniczenie unosu drobnych ziaren pyłu węglowego poza komorę PC2. Dolna komora PC1 składa się z kilku stopni o zmniejszających się średnicach. Na każdym ze stopni zostały stycznie umiejscowione dysze pozwalające na wprowadzanie do komory PC1 gazu „napędowego” o założonym składzie ( $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ). Obydwie komory (PC1 i PC2) połączone kanałem, w którym zabudowano odpowiednio ukształtowany nurnik wewnętrzny odpowiedzialny za rozdzielanie przepływu spalin z komory PC1 do PC2 od przepływu paliwa (pozostałości koksowej) z komory PC2 do komory PC1 (rys. 1). W dolnej części komory PC1 została osiowo umieszczona także dysza umożliwiająca wprowadzanie do komory PC1 recykulowanych gazów o zakładanym składzie.

Opracowana konstrukcja palnika składającego się z dwóch komór pozwala na:

- realizację procesu nagrzewania, suszenia i odgazowania paliw w komorze PC2;
- realizację procesu zgazowania węgla w atmosferze recykulowanych spalin ( $\text{CO}_2$  i  $\text{O}_2$ ) lub ( $\text{CO}_2$  i  $\text{O}_2$  oraz  $\text{H}_2\text{O}$ ) w celu maksymalizacji produkcji  $\text{CO}$  i  $\text{H}_2$ , a także realizację spalania pewnej części pozostałości koksowej w celu wygenerowania potrzebnej ilości ciepła do utrzymania i kontroli przebiegu reakcji endotermicznych.

Przeprowadzone eksperymenty oraz obliczenia numeryczne wykazały, że opracowany palnik cyklonowy może służyć jako urządzenie zarówno do spalania, jak i zgazowania pyłu węglowego. Zmiana charakteru pracy palnika następuje wskutek zmiany strumienia paliwa podawanego do urządzenia oraz zmiany strumienia i składu gazu „napędowego” ( $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ) zastosowanego w procesie spalania/zgazowania. W procesie zgazowania pyłu węglowego można też wykorzystać parę wodną pozwalającą uzyskać w produktach wysoką zawartość  $\text{CO}$  i  $\text{H}_2$ .

Zgodnie z wykonanymi badaniami na wylocie z palnika można osiągnąć stężenie  $\text{CO}$  na poziomie 80% w przypadku zgazowania pyłu węglowego w atmosferze  $\text{O}_2$



Rys. 1. Schemat oraz geometria palnika cyklonowego

i  $\text{CO}_2$ . Gdy natomiast zastosuje się jako czynnik zgazowujący mieszaninę  $\text{O}_2$  i  $\text{CO}_2$  oraz  $\text{H}_2\text{O}$ , gazy opuszczające palenisko mają zawartość  $\text{CO}$  i  $\text{H}_2$  na poziomie bliskim 50%. W takim przypadku możliwe jest uzyskanie gazu o wartości opałowej ponad  $11 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$ .

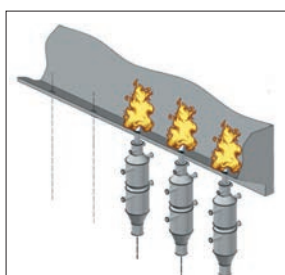
Dzięki silnemu zawirowaniu wewnątrz palnika cyklonowego możliwe jest znaczące ograniczenie strumienia popiołu lotnego kierowanego do komory kotła pyłowego oraz zminimalizowanie – nawet do zera – strat niecałkowitego spalania. Ponieważ proces spalania i zgazowania pyłu węglowego można prowadzić również w temperaturze przekraczającej temperaturę topnienia popiołu, możliwe jest odprowadzanie substancji mineralnych w postaci ciekłej.

## Współpraca palnika cyklonowego z kotłem pyłowym w warunkach zmiennego obciążenia

Jak wspomniano na wstępie, kotły pyłowe stanowią znaczącą część jednostek wytwórczych w KSE. Ich praca zależy od bieżącego zapotrzebowania odbiorców na moc elektryczną, z uwzględnieniem zmienności dobowej i sezonowej. Kotły te muszą się charakteryzować wysoką elastycznością oraz niskim minimum technicznym (*minimum load*). Obecnie większość palenisk charakteryzuje się minimum technicznym 40% MCR i dynamiką zmian obciążenia co najmniej 4%/min. Aktualne tendencje na świecie przewidują jednak minimum techniczne na poziomie 15% MCR bloku oraz możliwość zmian obciążenia z prędkością rzędu 10÷20%/min.

Możliwości obniżania minimum technicznego kotła z jednej strony są związane z zapewnieniem stabilnego

procesu spalania w palenisku bez użycia palników rozpałkowych, z drugiej zaś wymagają odpowiedniej cyrkulacji wody w rurach ekranowych kotła. Oprócz tego inne systemy i układy bloku muszą być dostosowane do pracy w tak ekstremalnych warunkach. Kluczowe jest oczywiście zapewnienie stabilnego procesu spalania. Obniżanie wydajności kotła pyłowego jest realizowane poprzez wyłączenie sekwencji palników pyłowych, a także zmniejszanie ilości pyłu węglowego podawanego do poszczególnych palników. W konsekwencji obniża się średnia temperatura w komorze paleniskowej, a ekrany kotła opromieniwane są jedynie lokalnie w sąsiedztwie pracujących palników. Dalsze zmniejszanie wydajności poza ten stan może powodować niestabilną pracę palników i zerwanie płomienia, a w konsekwencji – „wypadnięcie” (awaryjne wyłączenie) bloku. Rozwiązaniem tego problemu może być przedstawiona na rys. 2 zabudowa grupy palników cyklonowych współpracujących z kotłem pyłowym i podtrzymujących jego pracę przy niskiej wydajności.



Rys. 2. Propozycja zabudowy grupy palników cyklonowych w dolnej części kotła pyłowego

Zaproponowany w niniejszym artykule palnik jest bardzo elastyczny. Palnik (lub grupa palników) może bowiem pracować w następujących czterech reżimach:

1. Do palnika cyklonowego podawany jest strumień paliwa mniejszy od nominalnego. W komorze PC2 następuje nagrzewanie, suszenie i odgazowanie paliwa oraz częściowe spalanie części lotnych. W komorze PC1 następuje spalanie pozostałości koksowej oraz części lotnych. W takim przypadku palnik cyklonowy opuszczają jedynie gorące spaliny niezawierające gazów palnych. Spaliny te ogrzewają komorę kotła pyłowego, jednak nie wpływają na pracę palników pyłowych. Ten wariant pracy pozwala utrzymywać palnik cyklonowy w stanie gorącej rezerwy, w którym jest on gotowy do natychmiastowej zmiany obciążenia.

2. Do palnika cyklonowego podawany jest nominalny strumień paliwa (100% wydajności), co pozwala w danych warunkach aerodynamicznych na zupełne i całkowite spalanie w komorze PC1 odgazowanego paliwa w postaci pozostałości koksowej. W komorze PC2 następuje nagrzewanie, suszenie i odgazowanie paliwa, a w komorze PC1 – spalanie (zupełne i całkowite) pozostałości koksowej. Palnik cyklonowy opuszcza w tym przypadku mieszanka gazów palnych (niespalone części lotne) oraz spalin. Gazy odlotowe ogrzewają komorę kotła pyłowego, w której zostają dopalone części lotne z palnika.

3. Do palnika cyklonowego podawany jest strumień paliwa większy od nominalnego. W komorze PC2 następuje wtedy nagrzewanie, suszenie i odgazowanie paliwa. Ze względu na nadmiar paliwa w komorze PC1 jest ono jednak tylko częściowo spalane, a pozostała ilość ulega zgazowaniu. Palnik cyklonowy opuszcza gazy składające się z produktów odgazowania, zgazowania i spalania paliwa – gazy te mogą zostać dopalone w komorze kotła pyłowego. W takim przypadku (gdy zapotrzebowanie na moc jest poniżej minimum technologicznego palników pyłowych i konieczne jest ich wyłączenie) większość ciepła, niezbędnego do utrzymania wymaganej temperatury w palenisku,

dostarczana jest przez palnik cyklonowy i kocioł może być utrzymywany w gorącej rezerwie bez potrzeby włączania olejowych lub gazowych palników rozpałkowych.

4. Do palnika cyklonowego podawany jest strumień paliwa oraz popiołu lotnego (np. zawierającego dużo części palnych). Strumień pyłu węglowego podawany jest w takim wypadku do komory PC2, gdzie następuje proces nagrzewania, suszenia i odgazowania, a pozostałość koksowa jest dopalana w komorze PC1. W komorze PC1 realizowane jest spalanie w wysokiej temperaturze (ponad  $1400\div 1500^{\circ}\text{C}$ ) pozostałości koksowej, a dodatkowo wprowadzany jest tam pneumatycznie popiół lotny. W wyniku zawirowania i wysokiej temperatury popiół ulega błyskawicznemu nagrzanemu i stopieniu, dzięki czemu spływa po ścianach komory PC1 do wanny żuźlowej, gdzie ulega ochłodzeniu i zestaleniu. Ten tryb pracy palnika cyklonowego pozwala na elastyczną użycie popiołów lotnych i ich wityfikację. W tym przypadku palnik opuszcza mieszaninę gazów palnych (części lotnych) oraz spalin o wysokiej temperaturze. Dopalenie części lotnych i przekazanie ciepła fizycznego zawartego w tych gazach następuje w komorze kotła pyłowego.

Opisane przypadki pracy palnika cyklonowego można realizować zarówno przy maksymalnej wydajności kotła (co powoduje jej zwiększenie oraz wzrost dynamiki pracy układu), jak i w celu obniżenia minimum technologicznego kotła. W tym drugim przypadku, w zależności od mocy i liczby palników cyklonowych zabudowanych w układzie kotła pyłowego, możliwe są: wyłączenie określonej liczby palników pyłowych i stabilizacja pracy kotła poprzez dopalanie gazów generowanych w palnikach cyklonowych. Można też rozważyć całkowite wyłączenie palników pyłowych i utrzymywanie kotła w gorącej rezerwie (np. zgodnie z reżimem 4) dzięki realizacji wityfikacji (lub dopalania) popiołów – np. podczas tzw. doliny nocnej.

## Podsumowanie

Przedstawione w pracy rozwiązanie palnika cyklonowego, stanowiącego część kotła pyłowego, pozwala na:

- zwiększenie elastyczności i dynamiki pracy bloków z kotłami pyłowymi,
- wzrost wydajności cieplnej kotłów,
- obniżenie minimum technologicznego pracy kotła pyłowego bez konieczności uruchamiania palników rozpałkowych,
- realizację procesu spalania i/lub zgazowania paliw stałych,
- prowadzenie procesu wityfikacji popiołów (np. w tzw. dolinie nocnej).

Proponowane rozwiązanie stanowi interesującą opcję technologiczną, ukierunkowaną na retrofit i modernizację bloków pyłowych klasy 200 MW w ramach Programu Ramowego „Energetyka 200+”. Rewitalizacja i odbudowa mocy na bazie bloków 200 MW”.

**Artykuł powstał w ramach programu badań statutowych Politechniki Częstochowskiej BS/PB-404-301/11.**

## LITERATURA

1. Chmielniak T. „Technologie energetyczne”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2014.
2. Szargut J., Ziębik A. „Podstawy energetyki cieplnej”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1998.
3. Pawlik M., Strzelczyk F. „Elektrownie”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2012.
4. Zarzycki R., Bis Z., Kobyłecki R. “The concept of coal burning in a cyclone furnace”. *Procedia Engineering*. 157 (2016): s. 472–479. ■