

Automatyczne sterowanie jakością spalania paliwa stałego w kotłach przemysłowo-grzewczych

*Aleksander Szkarowski, Sylwia Janta-Lipińska
Politechnika Koszalińska*

1. Wstęp

Jednym z głównych problemów naukowo-technicznych w zakresie doskonalenia spalania paliwa organicznego jest konieczność wspólnego rozpatrywania skomplikowanych i często nawzajem sprzecznych zagadnień podwyższenia ekonomiczności jego wykorzystywania i jednoczesnego zmniejszenia emisji szkodliwych składników spalin do atmosfery.

Nowoczesne wysokoefektywne rozwiązania inżynieryjno-techniczne w tym kierunku realizowane są najczęściej na dużych obiektach energetycznych, gdzie nawet pojedyncze wdrażanie nowej technologii lub sprzętu daje zauważalny efekt ekonomiczny i ekologiczny. Natomiast kotły małej i średniej mocy o przeznaczeniu przemysłowo-grzewczym znajdują się jakby na poboczu rozwoju techniki spalania. Znaczna część eksploatowanych obecnie kotłów takiego rodzaju jest przestarzała konstrukcyjnie. Ich praca charakteryzuje się niskim poziomem technologicznym zarówno ze względu na oszczędzanie energii jak i w sensie ekologicznym.

Należy zauważyć, że w dzisiejszych czasach nie wszystkie zakłady przemysłowe i ciepłownicze mogą pozwolić sobie na zakup nowego sprzętu. Należy przyznać jednak, że większość kotłów jest niezawodna i przez dłuższy czas może być jeszcze eksploatowana. Dlatego przy rozwiązaniu kompleksowego zagadnienia energo-ekologicznego spalania paliwa w funkcjonujących kotłach przemysłowych i grzewczych na pierwszym miejscu znajdują się środki naukowo-techniczne wykorzystujące ukryte rezerwy istniejącego sprzętu. To pozwala zamiast kosztownej zmiany sprzętu na maksymalne wykorzystanie jego możliwości eksploatacyjnych.

We współczesnej terminologii naukowo-technicznej taki kierunek badań i opracowań definiuje się jako zagadnienie energo-ekologicznej modernizacji (rehabilitacji) działających urządzeń techniki cieplnej [14]. W poprzednich publikacjach [1, 2, 3] udowodniono możliwości osiągnięcia wskaźników sprawności i ekologiczności kotłów przy spalaniu paliwa gazowego i ciekłego w istniejących kotłach odpowiadających wymaganiom UE przez wdrażanie technologicznych środków bez zmiany sprzętu lub jego kosztownej przebudowy. Celem przedstawionych w niniejszym artykule badań było rozpowszechnienie opracowanych metod na kotły na paliwie stałym.

2. Wybór sposobu optymalizacji spalania paliwa

Rozmaitość metod rozwiązywania zagadnienia energo-ekologicznej optymalizacji spalania paliwa wynikająca z ogromnej różnorodności urządzeń paleniskowych i palnikowych nie została jeszcze sklasyfikowana w jednolity sposób. W związku z ważnością tej kwestii autorzy proponują następującą klasyfikację kierunków energo-ekologicznej modernizacji funkcjonującej techniki grzewczej (rys. 1). Jednym z najbardziej perspektywicznych rozwiązań energo-ekologicznej modernizacji jest optymalizacja procesu spalania wg kryterium ekonomiczności i ekologicznej doskonałości.

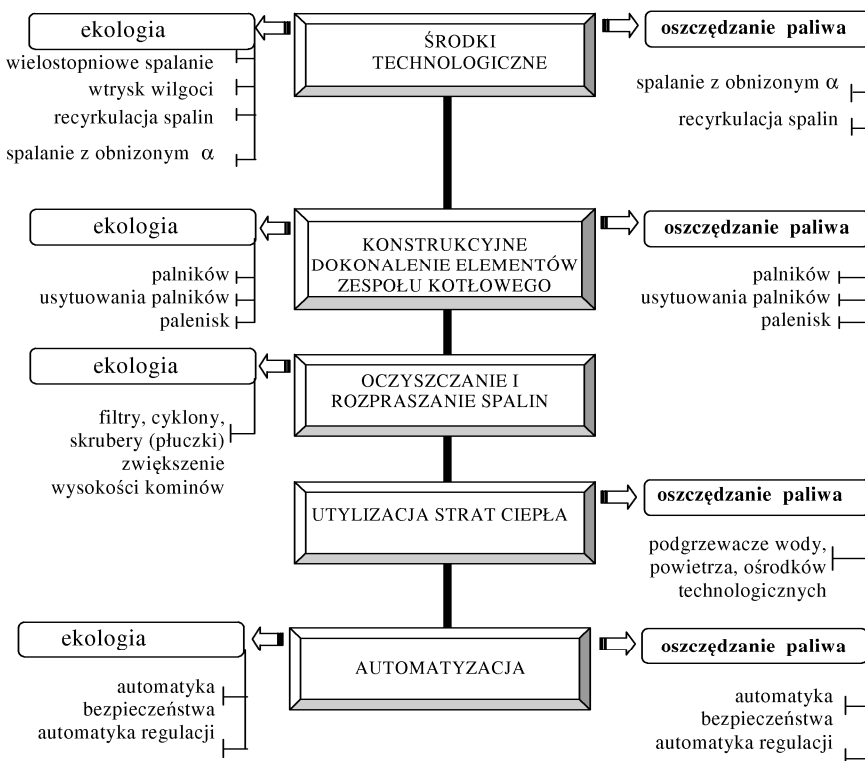
Należy tutaj podkreślić uniwersalny charakter automatyzacji, doskonalenia konstrukcyjnego i rozwiązań technologicznych. To właśnie one w pewnych warunkach pozwalają jednocześnie rozwiązać zagadnienia oszczędzania paliwa i podwyższenia ekologicznych wskaźników jego spalania zapewniając tym samym rozwiązanie zdefiniowanego kompleksowego zagadnienia energo-ekologicznej optymalizacji spalania paliwa.

Doskonalenie konstrukcyjne kotłów jest jednym ze sposobów modernizacji pozwalającym jednocześnie rozwiązywać ekologiczną i energooszczędną składową procesu optymalizacji. Wśród głównych kierunków doskonalenia konstrukcyjnych elementów zespołu kotłowego wyróżnia się:

- doskonalenie konstrukcji palników,
- doskonalenie konstrukcji komór paleniskowych,
- optymalizacja schematu usytuowania palników.

Doskonalenie konstrukcji palników przewiduje zastosowanie technologicznych metod spalania paliwa:

- spalania dwustopniowego,
- recyrkulacji spalin,
- spalania ze skrajnie obniżonym α ,
- wprowadzenia wilgoci do strefy spalania.



Rys. 1. Klasyfikacja kierunków energo-ekologicznej optymalizacji
Fig. 1. Classification of the energy and ecology optimization

Rozwiązania tego rodzaju skierowane są jednocześnie na zdławienie tlenu azotu i zwiększenie zupełności spalania paliwa. Efektywność takich rozwiązań w znacznym stopniu zależy od możliwości podstawowego i pomocniczego sprzętu kotłowego, konstrukcji palników, palenisk, wentylatorów nadmuchowych i wyciągowych, stopnia automatyzacji kontroli i regulacji parametrów technologicznych.

Zgromadzone doświadczenie z wdrażania rozwiązań technologicznych na kotłach energetycznych pozwala wnioskować o istnieniu znacznej rezerwy ze względu na ich zastosowanie przy spalaniu paliwa na kotłach grzewczych i przemysłowych [8, 9, 10, 11, 14].

Szereg badań w zakresie technologii środków doskonalenia spalania paliwa na kotłach przemysłowo-grzewczych ujawnił możliwość zmniejszenia emisji NO_x o 20÷60% z wykorzystaniem technologicznych rozwiązań [14].

Nowym osiągnięciem autorów okazuje się być stwierdzenie, że podwyższeniu sprawności spalania paliwa towarzyszy zmniejszeniu emisji NO_x [4].

Jednym z najważniejszych zagadnień przy wykorzystaniu rozwiązań technologicznych jest optymalizacja parametrów wywierających wpływ na wartość uogólnionego energo-ekologicznego kryterium. Osiągnąć maksymalny efekt optymalizacji można wyłącznie poprzez wykorzystanie automatycznej regulacji sterowanych czynników na podstawie mikroprocesorowych układów automatyki. Wymagana dokładność utrzymywania wartości sterowanych czynników nie jest osiągnięta przy wykorzystaniu tradycyjnych środków automatyki a tym bardziej przy regulacji ręcznej. Poza tym naturalne wahania czynników wpływu nie mające praktycznego znaczenia przy pracy kotła wg jego paszportu nie są dopuszczalne przy rozważaniu zagadnień optymalizacji, ponieważ wiele z wartości optymalnych znajduje się na granicy niedopału chemicznego.

Automatykę kotłowni umownie można podzielić na dwie części, ze względu na przeznaczenie, ale często połączone są one w jednym układzie ze względu na kontrolowany parametr [12]. Tymi częściami są automatyka bezpieczeństwa i automatyka regulacji.

Do parametrów kontrolowanych zalicza się:

- przepływy: pary, wody, paliwa, niekiedy powietrza i spalin,
- ciśnienie: pary, wody, gazu, paliwa, powietrza,
- podciśnienie: w elementach i przewodach spalinowych kotła i sprzętu pomocniczego,
- temperatura: pary, wody, paliwa, powietrza i spalin,
- poziom wody: w walczaku, cyklonach, zbiornikach, odgazowywaczach,
- poziom paliwa w zasobnikach i zbiornikach,
- skład gazów spalinowych, pary i wody.

Z doświadczenia automatyzacji kotłowni przemysłowo-grzewczych [12, 13] wynika, że pełna regulacja procesu spalania kotłowego, sprawności spalania paliwa (przepływ powietrza) oraz podciśnienia w palenisku pozwala osiągnąć 10% oszczędzania paliwa, zmniejszyć liczebność personelu obsługującego, zmniejszyć częstotliwość i wielkość prac remontowych, a także podwyższyć kulturę pracy [12].

Do szczegółów znanych układów automatyki regulacji kotłów typu WR-25 odnosi się występowanie sterowania przepływem paliwa, przepływem powietrza (tylko proporcjonalnie do przepływu paliwa, ze stałym stosunkiem przy wszystkich obciążeniach), podciśnieniem w palenisku, poziomem wody w walczaku kotła oraz mało rozwiniętych systemów regulacji automatycznej z zakresu środków technologicznych lub braku owych [7, 12].

Najbliższą ze względu na istotę techniczną do rozpatrywanej w referacie ideologii automatycznej optymalizacji regulowanych parametrów z zakresu środków technologicznych jest system sterowania sprawnością spalania paliwa [12]. W określonych warunkach system ten daje możliwość optymalizacji stosunku „paliwo-powietrze” przez spalanie ze skrajnie obniżonym nadmiarem powietrza.

We współczesnej technice kotłowej stosuje się wiele schematów sterowania sprawnością pracy kotła. Najbardziej rozpowszechnione w praktyce są układy sterujące przepływem powietrza odpowiednio do wartości stężenia wolnego tlenu w spalinach lub proporcjonalnie do przepływu paliwa.

3. Analityczne uzasadnienie i opracowanie układów automatycznego sterowania jakością spalania paliwa

Obiektem regulacji jest kocioł rusztowy wodny WR-25 o przeznaczeniu przemysłowo-grzewczym. Kotły wodne to typoszereg: WR 1,25; WR2,5; WR 5; WR 10; WR 25; WR 46.

Tabela 1. Typoszereg kotłów rusztowych WR

Table 1. WR grate boiler series

Rodzaj kotła	Wydajność maksymalna [MW]
WR-1,25	1,4
WR-2,5	2,8
WR-5	6,0
WR-10	12,0
WR-25	30,0
WR-46	54,0

Kotły wyposażone są w tradycyjne palenisko warstwowe z mechanicznym rusztem łuskowym (rys. 2). Większość pracujących obecnie kotłów tego typu, zwłaszcza tych o mniejszej wydajności i mocy nie ma podgrzewaczy powietrza oraz bardzo rzadko stosuje się w nich rozdział powietrza na powietrze pierwsze i drugie.

Typ paleniska i rusztu oraz sposób składowania zależą od rodzaju paliwa tj. od sortymentu, wartości opałowej, ilości części mineralnej, wilgotności oraz od temperatury spiekania, mięknięcia i topliwości części mineralnych (popiołu). Zadanie palenisk rusztowych jest doprowadzenie w sposób płynny i ciągły paliwa na ruszt stosownie do obciążenia kotła, zapewnienie odpowiedniej temperatury oraz doprowadzenie powietrza w ilości niezbędnej do całkowi-

tego spalania paliwa. Ważnym czynnikiem jest odpowiedni rozdział powietrza na powietrze pierwsze (pierwotne) podawane przez układ strefowy rusztu oraz powietrze wtórne podawane przez dysze zbudowane w ścianach komory paleniskowej (dysze mogą znajdować się na dwóch poziomach na ścianie przedniej lub na ścianach bocznych komory paleniskowej).



Rys. 2. Kocioł WR-25 na paliwo stałe z wielostrefowym doprowadzeniem powietrza
Fig. 2. Solid fuel boiler WR-25 with distributed input of air

W komorze paleniskowej wyposażonej w ruszt taśmowy lub łańcuchowy paliwo zalega w postaci warstwy, a proces spalania zachodzi na całej długości rusztu. Od miejsca zsypu węgla na ruszt w kierunku posuwu rusztu następują kolejno procesy: nagrzewanie i suszenie, odgazowywanie, zapłon, spalanie i wypalanie koksu. Procesy te zależą od rodzaju paliwa, a zwłaszcza od zawartości części lotnych w węglu, co decyduje o podziale powietrza do poszczególnych stref. Wadą kotła z paleniskiem rusztowym jest trudność utrzymania optymalnego współczynnika nadmiaru powietrza w obszarze mały obciążień,

a to z kolei prowadzi do wzrostu emisji tlenków azotu. Wzrost współczynnika nadmiaru powietrza dla małych obciążeń jest spowodowany koniecznością chłodzenia rusztu. Najlepszym sposobem zapewnienia odpowiednich prędkości powietrza przez rusztowiny i warstwę paliwa jest zastosowanie recyrkulacji spalin (pobór spalin z za wentylatora wyciągowego spalin i podanie z powietrzem pod ruszt). Recyrkulacja spalin do komory paleniskowej powoduje obniżenie w niej temperatury, a to prowadzi do zmniejszenia emisji tlenków azotu.

Aby zapewnić odpowiednią prędkość powietrza drugiego w celu dobrego wymieszania spalin (strugi bogate i ubogie w tlen) na wylocie dysz należy również wprowadzić część spalin. Spalanie paliw bogatych w części lotne powoduje znaczny wzrost temperatury w przedniej części paleniska i powstawanie tlenków azotu. Można temu zapobiec przez odpowiedni rozdział powietrza do stref rusztu oraz rozdział na powietrze pierwsze i drugie. W ten sposób można wyrównać rozkład temperatur w przekroju poprzecznym komory paleniskowej. Na rozkład temperatury w komorze paleniskowej ma również wpływ, ukształtowanie sklepienia zapłonowego. Kąt nachylenia sklepienia przedniego oraz jego długość mają wpływ na proces odgazowywania węgla. W niższej temperaturze odgazowywania i dla zmniejszenia prędkości spalania wyzwała się mniej części lotnych co daje mniejszy udział związków lotnych zawierających azot, a część azotu paliwowego pozostaje w koksie dopalonym w końcowej części rusztu.

Ilość przereagowanego azotu z koksu jest mniejsza od wytworzonego tlenku azotu w fazie gazowej z azotu zawartego w częściach lotnych. Można to zrealizować przez kierowanie spalin z za kotła do poszczególnych stref rusztu (zmniejszenie nadmiaru powietrza) oraz bezpośrednio do paleniska w celu wymieszania spalin bogatych i ubogich w tlen. W tym przypadku dysze powietrza wtórnego umieszcza się w górnej części komory paleniskowej. Emisja pyłu w kotłach rusztowych zależy od rodzaju spalonego paliwa i zawartości części mineralnych w węglu. W kotłach rusztowych 70÷80% popiołu w postaci żużła przechodzi do leja żużlowego, a pozostała część zostaje unoszona ze spalinami. Część lotnego popiołu wytrąca się w lejach poszczególnych ciągów kotła, a pozostała część jest oddzielana w urządzeniach odpylających. Obecnie stosuje się odpylacze cyklonowe, filtry tkaninowe, a większych jednostkach – elektrofiltry.

Małe zawartości popiołu w spalinach z kotłów rusztowych umożliwiają stosowanie prostszych i tańszych instalacji odpylających niż przy kotłach z paleniskami pyłowymi lub fluidalnymi.

Zawartość części mineralnych w węglu nie powinna być zbyt mała (10÷25%) gdyż po spaleniu żużel tworzy warstwę ochronną tylniej części rusztu przed promieniowaniem jądra płomienia (przeegrzanie rusztu). Duża ilość części mineralnych w węglu nie ma wpływu na proces spalania, charakterystyka topliwości popiołu natomiast, a zwłaszcza temperatura spiekania i temperatura mięknięcia decydują o poprawnej pracy kotła (szlakowanie). Zdolność szlakowania

mają popioły, w temperaturze między punktem pięknienia a topienia. Temperatura ta zależy od składu chemicznego części mineralnych (związki żelaza, wapnia i magnezu obniżają temperaturę pięknienia i topliwości natomiast tlenki krzemu i glinu zwiększają temperaturę topliwości). Zawartość związków żelaza, którego ilość w węglu waha się w dość szerokich granicach, decyduje o szlakowaniu. Dla przykładu popiół o składzie $\text{SiO}_2 - 43\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 13\%$, $\text{MgO} - 5\%$, $\text{CaO} - 3\%$ ma temperaturę mięknięcia 1200°C , popiół o zawartości $\text{SiO}_2 - 55\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 6\%$, $\text{MgO} - 0,2\%$, $\text{CaO} - 1,4\%$ ma natomiast temperaturę mięknięcia 1480°C . Konstrukcja kotła, a zwłaszcza komory paleniskowej, powinna być taka, aby nastąpiło całkowite i zupełne spalanie, nie tworzyła się szlaka i nie występowało szlakowanie powierzchni ogrzewalnych [5].

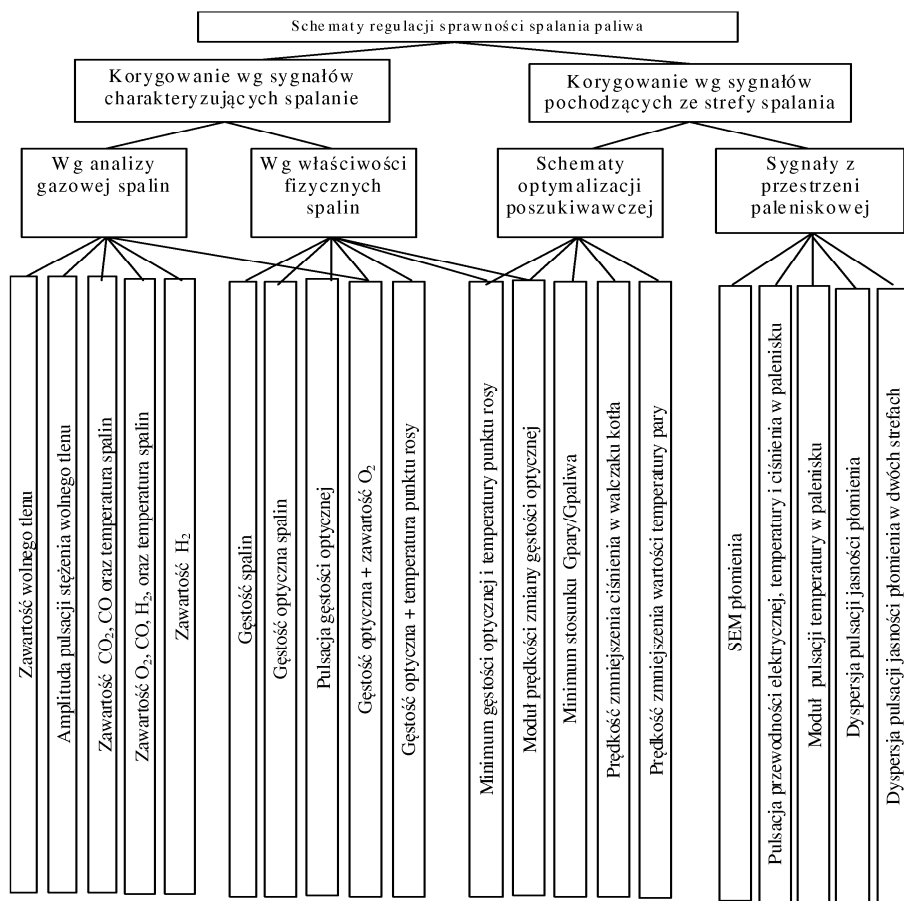
4. Uzasadnienie koncepcji regulacji automatycznej

We wcześniejszych publikacjach autorzy sformułowali zasady spalania paliwa z zastosowaniem metody regulowanego resztkowego niedopału chemicznego [4]. To wymaga określenia zależności bezwzględnej wartości niedopału chemicznego (CO_e , mg/m^3) i tlenków azotu NO_x (mg/m^3) od wydajności i trybu powietrznego paleniska, które wyrażane jest przez przepływ gazu i powietrza. Do tej pory automatyzacja ograniczona była tylko do regulacji poziomów w walcu kotła. Rozwój automatyzacji procesów technologicznych wykazuje, że charakterystycznym szczegółem opracowania systemu sterowania jest w pierwszej kolejności nie przeszukiwanie optymalnych algorytmów funkcjonowania, lecz wybór optymalnego systemu informatyczno-pomiarowego [15]. Wybór typu i ilości kanałów łączności obiektu z regulatorem i usytuowanie punktów odbioru sygnałów charakteryzujących pracę obiektu wywiera decydujący wpływ na jakość funkcjonowania układu sterowania.

Opracowanie systemów regulacji sprawności zużycia paliwa można podzielić na dwie grupy w zależności od stosowanych sygnałów korygujących. W pierwszej grupie korygowania dostarczanie powietrza wykonuje się według sygnałów charakteryzujących wyniki spalania paliwa, natomiast w drugiej – według sygnałów odbieranych w trakcie spalania. Z kolei pierwszą grupę sygnałów korygujących można podzielić na dwie samodzielne podgrupy. Jedna z nich wykorzystuje skład gazowy produktów spalania zaś druga podgrupa oparta jest na sygnałach, które powstają na drodze pomiaru właściwości fizycznych spalin. Poszukiwanie schematów sterowania ekonomicznością jest bardzo zróżnicowane według sygnałów charakteryzujących reakcje spalania np. poprzez korygowanie dostarczanego powietrza wg wartości SEM (Siła Elektromotoryczna), które powstaje w dwóch równoległych usytuowanych w płomieniu prętach. Uważa się, że wartość SEM zależy od współczynnika nadmiaru powietrza oraz wydajności zespołu kotłowego, co pozwala wiarygodnie charaktery-

zować proces spalania – poprzez pomiar pulsacji przewodności elektrycznej płomienia i temperatury czyli na podstawie średniocalkowej wartości tych pulsacji, które kształtują sygnał sterujący (rys. 3).

W schematach regulacji „paliwo-powietrze” sygnał regulacji stosuje się jako korygujący. W przypadku zmiany ciśnienia w głównej magistrali włącza się regulator paliwa zmieniający jego dopływ do palników. Tę zmianę przekazuje się do regulatora powietrza, który odpowiednio zmienia przepływ powietrza do momentu aż impuls wg przepływu powietrza skompensuje impuls wg przepływu paliwa.



Rys. 3. Klasyfikacja sposobów regulacji sprawności

Fig. 3. Classification of the efficiency regulation methods

W przypadku zmiany wartości opalowej paliwa niezmienna pozostaje zawartość tlenu w spalinach przy nieziennej wydajności kotła. Można stwierdzić, że informacje o zawartości wolnego tlenu polepszają pracę rozpatrywanego schematu, jak również innych schematów recyrkulacji stosunku „paliwo-powietrze”. Warianty udoskonalonych w ten sposób układów okazują się duże i skomplikowane w nastawianiu. Dlatego dalszym rozwojem stają się schematy regulacji ekonomiczności, w których funkcje regulatora spełnia sam regulator wolnego tlenu w spalinach.

Podkreślić należy, że schematy sterowania ekonomicznością oparte wyłącznie na informacji o zawartości wolnego tlenu w realnych warunkach eksploatacji nie zawsze się sprawdzają. Na przykład jeśli z jakichkolwiek przyczyn pojawi się niedopał chemiczny wówczas zawartość wolnego tlenu w spalinach zwiększa się regulator wolnego tlenu dążąc do utrzymania zadanego nadmiaru powietrza zmniejszy jego przepływ a to spowoduje dalsze zwiększenie niedopału i odpowiednich strat paliwa. Dlatego też proponuje się stosować impuls wg amplitudy pulsacji wolnego tlenu. Wiadomo jest, że sprawność kotła osiąga maksymalną wartość gdy suma strat ciepła od niedopału chemicznego i strat spalinowych będzie minimalna. Dlatego powstał układ wykorzystujący sygnały o temperaturze spalin i zawartości w nich CO_2 i CO .

W późniejszych pracach tego kierunku sygnał o zawartości CO_2 którego stabilność charakteryzuje optymalny tryb spalania tylko dla określonego paliwa i przy niezmiennym obciążeniu cieplnym paleniska zastąpiony został sygnałem o zawartości wolnego tlenu.

Zgodnie z propozycją w [16] sygnał wg CO i H_2 w schemacie regulacji dopływu powietrza jest głównym i blokuje inne sygnały w przypadku zwiększenia produktów niedopału powyżej zadanej normy. W innych trybach gdy straty ciepła od niedopału chemicznego są mniejsze od wartości granicznej sterowanie dopływem powietrza wykonuje się według zawartości wolnego tlenu i temperatury spalin. Należy jeszcze raz podkreślić, że stabilność tylko tych dwóch parametrów nie charakteryzuje w pełni optymalnego trybu spalania ponieważ przy różnych obciążeniach kotła optymalna wartość współczynnika nadmiaru powietrza również się różni.

Sposób optymalizacji procesu spalania z wykorzystaniem korygującego sygnału według minimum strat od niedopału chemicznego zaproponowano w [17]. Jako sygnał charakteryzujący te straty przyjęto stężenie H_2 w spalinach na poziomie 0,005%. Działanie układu różni się w trybach stabilnych i w trybach przejściowych.

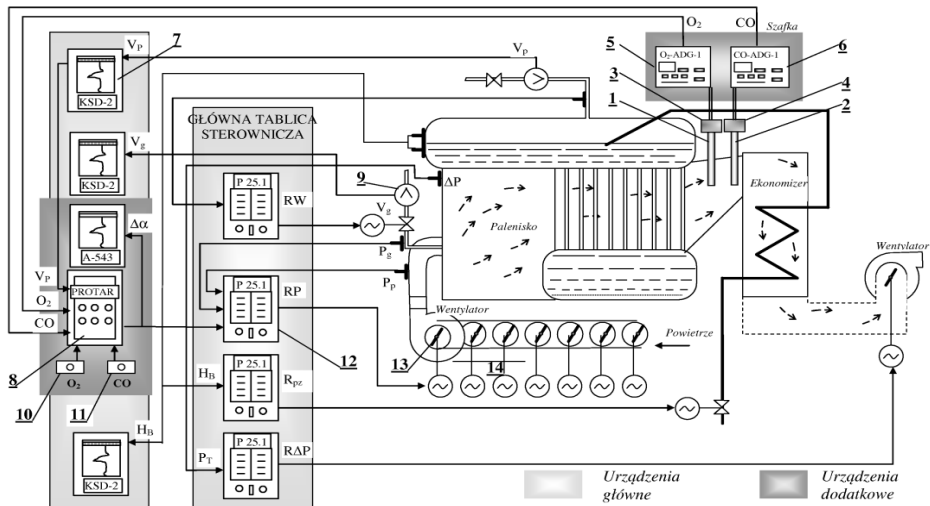
Analiza znanych układów regulacji ekonomiczności ze względu na zgodność z głównymi celami tej regulacji wskazuje że najbardziej efektywnym jest układ z wykorzystaniem regulujących i korygujących impulsów na podstawie informacji o zawartości tlenu i tlenku węgla [18]. Konieczność pomiaru zawartości CO , według większości autorów w sposób najbardziej pełny i opera-

tywny charakteryzuje zupełność spalania i częściowo ekologiczną czystość procesu [19].

Analiza wyników badań określających wartość uogólnionego kryterium energo-ekologicznego w strefie regulowanego resztkowego niedopału chemicznego za pomocą modelu fizyko-matematycznego świadczy o wiarygodności kryterium optymalności procesu paleniskowego odpowiadającego określonej zawartości CO w spalinach. Wartość optymalnego stężenia CO odniesiona do jednakowego nadmiaru powietrza (np. $\alpha=1$) zależy od rodzaju palnika i obciążenia kotła. Jednak wykorzystanie wyłącznie informacji o niedopale chemicznym w układzie automatycznej regulacji stosunku „paliwo powietrze” ograniczone jest w wyniku występowania tzw. „ślepych stref”, w których regulator nie uzyskuje wystarczającej informacji ilościowej niezbędnej do regulacji [7]. Taka sytuacja powstaje w przypadku odchylenia faktycznego nadmiaru powietrza ustalanego przez główny układ automatyki według stosunku „ciśnienie gazu/ciśnienie powietrze” ustalonego podczas nastawiania kotła. Przyczynami takiego odchylenia są zmiany wartości czynników zewnętrznych rozpatrzonych w rozdziale 2 podczas opracowania modelu fizyko-matematycznego z uwzględnieniem bardzo wąskiej strefy nadmiaru powietrza przy spalaniu według metody RRNCH oraz niewystarczającej dokładności regulacji przepływu powietrza od strony głównego układu automatyki. W przypadku przewyższenia optymalnej wartości α_{opt} względem faktycznej wartości α_f , z uwzględnieniem lawinowego charakteru wzrostu stężenia tlenku węgla wartość CO wychodzi poza granice przedziałów pomiarowych analizatora i cały system regulacji trafi do górnej ślepej strefy. Odwrotnie w przypadku przewyższenia α_f od α_{opt} brak śladów niedopału chemicznego wprowadza system regulacji do dolnej „ślepej strefy”. Poza tym brak informacji o wartości nadmiaru powietrza powoduje zniekształcenie faktycznej zawartości CO obniżając ją 1,2÷1,4 razy (czyli o 20÷100 ppm). Ten fakt wymaga obowiązkowo stosować pomiar stężenia O₂, którego wartość zmienia się niemal proporcjonalnie do przepływu powietrza w strefie krytycznych wartości α .

5. Funkcjonalny schemat blokowy SAR

Zgodnie z wybraną ideologią budowy SAR opracowano system sterowania jakością spalania paliwa [6]. Funkcjonalny schemat blokowy zespołu z opracowanym systemem kontroli i sterowania jakością spalania paliwa pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Funkcjonalny schemat blokowy zespołu kotłowego z systemem sterowania spalaniem paliwa

Fig. 4. Functional block scheme of the boiler unit with the fuel burning control system

Głównym przeznaczeniem regulatora stosunku „paliwo-powietrze” jest korygowanie liniowej zależności między ciśnieniem paliwa a powietrza realizowanej w głównym realizatorze przepływu powietrza zgodnie ze zmianami zewnętrznych czynników zakłócających, które mogą wywierać wpływ na optymalność trybu spalania.

Koncepcja opracowanego systemu optymalnego sterowania przewiduje, że do istniejącego układu automatycznej regulacji dołącza się dodatkowo regulator korygujący wykonany na bazie programowanego regulatora mikroprocesorowego (w oryginalnej wersji – „PROTAR” lub „Miniterm-300”). Takie rozwiązanie pozwala zrealizować algorytm regulacji po praktycznie nieograniczonej złożoności.

6. Wnioski

1. Porównawcza analiza metod podwyższania efektywności i jakości spalania paliwa stałego w kotłach przemysłowo-grzewczych ujawniła niewątpliwe zalety kierunku technologicznego z obowiązkowym zastosowaniem automatycznej regulacji wyznaczonych czynników.
2. Jedną z najbardziej efektywnych metod odpowiadającą koncepcji mało kosztownej modernizacji jest spalanie paliwa z regulowanym reszkowym niedopałem chemicznym z zastosowaniem układu automatycznej optymalizacji regulacji parametrów wyznaczających przebieg procesu spalania.

3. Analiza doświadczenia wdrażania środków technologicznych na kotłach przemysłowo-grzewczych świadczy o ich na ogół wysokiej efektywności, która jednak w znacznym stopniu uzależniona jest od typu i stanu technicznego wykorzystywanego sprzętu podstawowego i pomocniczego.
4. Z uwzględnieniem koncepcji energo-ekologicznej modernizacji istniejących urządzeń techniki kotłowej można polecić następujący schemat jej realizacji:
 - automatyzacja regulacji stosunku „paliwo-powietrze”,
 - optymalizacja spalania na zasadzie technologicznej metody regulowanego resztkowego niedopału chemicznego,
 - optymalizacja spalania z zastosowaniem technologicznej metody wtrysku wilgoci do SDW (ewentualnie – uproszczonej recyrkulacji produktów spalania).
5. Głównym czynnikiem ograniczającym, który obecnie nie pozwala osiągnąć maksymalnego efektu energo-ekologicznego przy zastosowaniu środków technologicznych jest brak lub niski poziom automatycznej regulacji czynników wyznaczających przebieg procesu spalania, a tym bardziej ich optymalizacji. To uzasadnia istotną potrzebę opracowania udoskonalonych niedrogich i szybko wdrażanych systemów automatycznej optymalizacji trybów spalania.

Literatura

1. **Szkarowski A., Janta-Lipińska S.:** *Регулируемый остаточный химнедожог как инструмент оптимизации сжигания топлива*. Materiały IV Międzynarodowej Naukowo-Praktycznej Konferencji Nowoczesnych Naukowych Osiągnięć, Przemysł 2008.
2. **Szkarowski A., Janta-Lipińska S.:** *Fuel combustion optimizing by regulated level of chemical underburn*. Proceedings of the 21st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Cracow-Gliwice June 24-27, 2008.
3. **Szkarowski A., Janta-Lipińska S.:** *Энергетическая и экологическая оценка сжигания топлива с регулируемым остаточным химнедожогом*. V Международная научно-практическая конференция Новые топлива с присадками, Sankt Petersburg 2008.
4. **Szkarowski A., Nowikow O., Okatjew A., Kociergin M.:** *Intelektualny system sterowania jakością spalania paliwa*. Kompleksowe i szczegółowe problemy ochrony środowiska. VI Ogólnopolska Konferencja Naukowa. Koszalin-Ustronie Morskie, 2003.
5. **Kruczek St.:** *Kotły. Konstrukcje i obliczenia*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.

6. **Крыжановский В.Н.:** *Модельные исследования образования окислов азота в топливо-сжигающих устройствах // Окислы азота в продуктах сгорания топлива.* Киев. – С. 35-39, 1981.
7. **Кочергин М.А.:** *Особенности ведения режимов горения с использованием системы регулирования экономичным сжиганием топлива*". Тезисы докл. Междунар научн.-техн. конф. молодых ученых и студентов, С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т.– СПб.– Ч. 2.– С.132-135, 2000.
8. **Котлер В.Р., Беликов С.Е., Кругляк Е.Д.:** *Снижение выбросов оксидов азота при сжигании газа в котле ДЕ-25-14ГМ.* Пром. энергетика. №1. С. 29-31, 1993.
9. **Котлер В.Р., Енякин Ю.П.:** *Реализация и эффективность технологических методов подавления оксидов азота на ТЭС.* Теплоэнергетика. №6. С. 2-9, 1994.
10. **Беликов С.Е., Котлер В.П.:** *Малые котлы и защита атмосферы.* – М.". Энергоатомиздат. 125 с, 1996.
11. **Иванов В.В.:** *Исследование методов сокращения выбросов токсичных продуктов сгорания в котлах разной мощности при сжигании газа и мазута. Теория и практика сжигания газа*". Л. С. 325-327, 1981.
12. **Лохматов В.М.:** *Автоматизация промышленных котельных.* Л.: Энергия. 208 с, 1970.
13. **Новиков О.Н., Шкаровский А.Л. Кочергин М.А.:** *Снижение вредных выбросов при сжигании топлива в котлах и печах регулированием соотношения „топливо-воздух”.* Тез. докл. семинара “HI-TECH Investments Innovations”. СПб. С.64-65, 1999.
14. **Шкаровский А.Л.:** *Повышение эффективности защиты воздушного бассейна при сжигании газообразного и жидкого топлива.* Дис. д-ра. техн. Наук, С.-Петербург. гос. архитектур.–строит. ун-т. СПб. 354 с, 1997.
15. **Ротач В. Я.:** *Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами*". М.: Энергоатомиздат. 296 с, 1985.
16. А. с. 274297 (СССР). -Б. И., 1970. №21
17. А. с. 231701 (СССР). -Б. И., 1968. №36.
18. **Шкаровский А.Л., Кочергин М.А., Новиков О.Н.:** *Выбор сигналов коррекции для систем регулирования экономичным сжиганием топлива.* Докл. 56-й науч. Конф. профессоров, преподавателей, науч. работников, инженеров и аспирантов ун-та, С.-Петербург. гос. архитектур.–строит. ун-т.– СПб. Ч.1. С. 112–113, 1999.
19. **Новиков О.Н., Шкаровский А.Л. Кочергин М.А.:** *Снижение вредных выбросов при сжигании топлива в котлах и печах регулированием соотношения „топливо-воздух”.* Тез. докл. семинара “HI-TECH Investments Innovations”. СПб. С.64-65, 1999.

Automatic Control of Burning Quality of Solid Fuel in Industrial Heating Boilers

Abstract

The issue of improvement of organic fuel combustion provides for common solving of complex and often contrary problems of increase of its economic use and, at the same time, decrease of emission of harmful components into the atmosphere. One of the most perspective solutions of energy-saving and ecological modernization is optimization of the combustion process according to the criterion of economy and ecological excellence.

Technological measures constitute one of the ways of modernisation (figure 1), which, at the same time, makes it possible to solve the ecological and energy-saving constituent of the optimisation process without applying expensive structure changes. Such solutions are, at the same time, oriented on choking of nitrogen oxide and increase of completeness of fuel combustion. The effectiveness of such solutions largely depends upon capacities of basic and auxiliary boiler equipment, burner construction, furnaces, pressure and exhaust fans, control automation degree and quality of technological parameters.

One of the most significant issues relating to use of technological solutions is optimisation of parameters affecting the value of generalised energy-saving and ecological criterion. It is possible to achieve maximum optimisation effect only by use of automatic control of controlled factors on the basis of microprocessor automation systems. In practice, the most commonly used systems are systems of "fuel-air" relation, which control air flow in accordance with the concentration value of free oxygen or in proportion to the fuel flow. As shown in their definition, such systems cannot ensure simultaneous solving of fuel saving problems and decrease of emission of harmful fuel components into the atmosphere.

Test results as well as experience gained from numerous implementations of the team proved that it is possible to achieve promptness and ecological efficiency in relation to the existing boilers complying with requirements of the EU for gas and liquid fuel combustion. The aim of further research was to disseminate the methods developed in relation to boilers fueled by solid fuel. The subject of the research was a series of WR boilers designed to operate for industrial and heating purposes (Table 1). The boilers are equipped with a traditional layered furnace with a mechanical scaly bed (Figure 2).

Following selection and justification of control ideology (Figure 3), the authors developer rules for automatic control of fuel combustion quality. The concept of optimal control makes it possible to realize its algorithm on the basis of simultaneous measurements of oxygen and carbon dioxide in the fumes. The algorithm is a basis of operation of solid fuel combustion automatic control system (Figure 4), which contains a new element, namely zonal control of air flow. The envisaged effect of the system use is 10% of fuel saving per year with accompanying decrease of nitrogen oxides emission into the atmosphere by 20÷60%.

