

Aleksander SZKAROWSKI\*, Sylwia JANTA-LIPIŃSKA\*\*

## Optimalizacja pracy kotłów metodą sterowanego poziomu niezupełności spalania

**STRESZCZENIE.** Zasada energo-ekologicznej optymalizacji oznacza, że optymalny wynik spalania paliwa wyznaczany jest nie tylko poprzez bezpośrednią sprawność jego zużycia, lecz również przez minimalną szkodę wyrządzoną środowisku. Optymalizację spalania paliwa poprzez regulowany poziom niedopału chemicznego uważa się za jedną z najprostszych, najtańszych i wysokoefektywnych metod takiej optymalizacji.

Nieprawidłowe jest oczywiście wydawałoby się zdanie, że minimalny niedopał odpowiada maksymalnej sprawności zużycia paliwa w kotłach. Zarówno promieniowanie jak i konwekcyjne odbieranie ciepła przez powierzchnie ekranowe otaczające paleniska kotła w bardzo skomplikowany sposób zależy od wielu czynników: formy, rozmiarów i świecenia się płomienia, położenia strefy maksymalnych temperatur oraz całokształtu aerodynamiki przestrzeni paleniska.

Standardowe bilansowe próby kotła pokazują, że maksymalną jego sprawność notuje się przy zauważalnej niezupełności spalania odpowiadającej stężeniu CO na poziomie 0,02–0,03% obj. (200–300 ppm). Ponadto tlenki azotu które powstają w maksymalnej temperaturze, czyli przy braku niedopału, są substancjami około 35 razy bardziej toksycznymi niż tlenek węgla. Z tego wynika, że wyznaczenie dopuszczalnego poziomu niedopału chemicznego stanowi typowe zagadnienie optymalizacyjne, mające na celu zminimalizowanie pewnej funkcji celu. Skomplikowany charakter tego zagadnienia polega na konieczności jego indywidualnego rozwiązania w każdym konkretnym przypadku nastawiania kotła z uwzględnieniem charakterystyk i szczegółów wszystkich składowych urządzeń całego zespołu kotłowo-paleniskowego. Dla ujednoczenia tego problemu zostało zaproponowane ekologiczne i ekonomiczne kryterium spalania paliwa, jak również uogólnione kryterium energetyczno-ekologiczne będące poszukiwaną funkcją celu.

---

\* Prof. dr hab. inż., \*\* Mgr inż. — Katedra Sieci i Instalacji Sanitarnych, Politechnika Koszalińska, Koszalin.

Jak pokazały wyniki takich badań na kotłach, optymalny tryb spalania znajduje się w zakresie stężenia tlenku węgla w granicach 200–400 ppm. Regulacja automatyczna procesu spalania z zachowaniem niezupełności spalania na takim poziomie daje stały eksploatacyjny efekt energetyczno-ekologiczny.

SŁOWA KLUCZOWE: optymalizacja, spalanie, niedopał chemiczny, kryterium energo-ekologiczne, kocioł, analizator spalin

## Wprowadzenie

Zajmując się od wielu lat zagadnieniami teorii i praktyki efektywnego i przyjaznego środowisku zużycia paliwa, zespół autorski konsekwentnie promuje zasadę energetyczno-ekologicznej optymalizacji (Szkarovski 1999). Takie podejście oznacza, iż optymalny wynik spalania paliwa wyznacza się nie tylko bezpośrednią sprawnością jego zużycia, lecz również minimalną szkodą wyrządzoną ludziom i środowisku przyrodniczemu (Novikov i in. 2000).

Jednym z najprostszych, najtańszych i jednocześnie wysokoefektywnych sposobów takiej optymalizacji jest spalanie paliwa w strefie regulowanego resztkowego niedopału chemicznego (Baryszew i in. 1996). Dla wielu specjalistów to może brzmieć paradoksalnie. Większość specjalistów od eksploatacji kotłów przyzwyczajeni są przestrzegać niekwestionowaną regułę: w spalinach nie powinny występować produkty niezupełnego spalania paliwa, zwłaszcza przy spalaniu paliwa gazowego. Zadaniem tej publikacji jest spojrzenie na tą kwestię pod kątem pełnej energetyczno-ekologicznej optymalizacji, czyli optymalizacji zarówno pod względem oszczędzania paliwa, jak i ochrony środowiska.

### 1. Koncepcja regulowanego niedopału chemicznego

Za ilościową miarę niedopału chemicznego przyjmuje się zazwyczaj sumaryczne stężenie produktów niezupełnego spalania w spalinach ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  i  $\text{CH}_4$ ). Ten wskaźnik wyznacza straty ciepła od niedopału (wartość  $q_3$  w bilansie cieplnym agregatu kotłowego). Dążeniem do zmniejszenia  $q_3$  wyjaśnia się tradycyjne (z racji oszczędzania paliwa) wymaganie całkowitego braku produktów niedopału chemicznego w spalinach.

Zgodnie z wieloletnią praktyką nastawiania kotłów, w spalinach dopuszczalne są wyłącznie „ślady” produktów niezupełnego spalania, co odpowiada stężeniu  $\text{CO}$  na poziomie 30–50  $\text{mg/m}^3$ . W literaturze branżowej zaleca się zorganizowanie spalania ze współczynnikiem nadmiaru powietrza o około 0,03–0,04 większym od wartości „krytycznej” (z pewnym zapasem na ewentualne wahania czynników, wywierających wpływ na zupełność spalania). Przy czym za wartość „krytyczną” uważa się już sam fakt pojawienia się śladów produktów „niedopału” w spalinach (Trembovla i in. 1991).

Wyniki wykonanych przez zespół autorski obszernych badań świadczą o możliwości całkiem uzasadnionego, pod względem zarówno ekonomicznym jak i ekologicznym, zwiększenia maksymalnie dopuszczalnego poziomu stężenia tlenu węgla przy spalaniu gazu ziemnego w kotłach wyposażonych w wirowe palniki nadmuchowe.

Zwróćmy najpierw uwagę na nieprawidłowość – oczywistego, wydawałoby się – zdania, że minimalny niedopał odpowiada maksymalnej sprawności zużycia paliwa w kotłach. Zarówno promieniowe jak i konwekcyjne odbieranie ciepła przez powierzchnie ekranowe otaczające palenisko kotła w bardzo skomplikowany sposób zależy od wielu czynników: formy, rozmiarów i świecenia się płomienia, położenia strefy maksymalnych temperatur oraz całokształtu aerodynamiki przestrzeni paleniska. Nie można zapomnieć też o istotnym wpływie zużycia energii elektrycznej na napęd wentylatorów i wyciągów spalin na ogólną sprawność energetyczną kotła. Standardowe bilansowe próby kotła pokazują, że maksymalną jego sprawność notuje się przy zauważalnym poziomie niezupełności spalania, odpowiadającym stężeniu CO w spalinach na poziomie 0,02–0,03% obj. (200–300 ppm, lub 250–375 mg/m<sup>3</sup>).

Jeszcze bardziej logiczne jest „przesunięcie” trybu spalania ku strefie niedopału chemicznego ze względu na minimalny uszczerbek ekologiczny. Wystarczy przypomnieć, że tlenki azotu (NO<sub>x</sub>) najbardziej intensywnie powstające w maksymalnej temperaturze, czyli przy braku niedopału, są to substancje około 750 razy bardziej toksyczne niż tlenek węgla, taką bowiem wartość stanowi stosunek maksymalnie dopuszczalnych stężeń tych substancji we wdychanym powietrzu (odpowiednio 40 µg/m<sup>3</sup> i 30 mg/m<sup>3</sup>).

Z powyższych przesłanek wyraźnie wynika, iż wyznaczanie dopuszczalnego poziomu niedopału chemicznego stanowi typowe zagadnienie optymalizacyjne, mające na celu zminimalizowanie pewnej funkcji celu. Skomplikowany charakter tego zagadnienia polega na konieczności jego indywidualnego rozwiązania w każdym konkretnym przypadku nastawiania kotła, z uwzględnieniem charakterystyk i szczegółów wszystkich składowych urządzeń całego zespołu kotłowo-paleniskowego.

## 2. Kryterialna forma zagadnienia optymalizacji spalania paliwa

Możliwe są rozmaite podejścia do określenia wspomnianej funkcji celu. Dla zdefiniowania najprostszego kryterium optymalności procesu paleniskowego przyjęto:

- ✧ jako charakterystykę ekologiczności spalania – wskaźnik toksyczności spalin  $G_{sp}$  (w przeliczeniu na NO<sub>x</sub>, według I. Ja. Sigała (1988));
- ✧ jako wskaźnik sprawności zużycia paliwa – bilansową sprawność agregatu kotłowego (brutto)  $\eta_{br}$ ,

przy czym wskaźnik toksyczności określano na podstawie stężenia CO, NO<sub>x</sub> i 3,4-benz(a)-pirenu w spalinach, a sprawność – zgodnie ze standardową metodą prób bilansowych kotła (Trembovla 1991).

Ażeby ujednoczyć te wskaźniki zaproponowano następujące wzory kryteriów ekologiczności ( $A_1$ ) i ekonomiczności ( $A_2$ ) odzwierciedlających względną zmianę wybranych wyżej charakterystycznych parametrów:

$$A_1 = \frac{G_{sp} - G_{sp}^{\min}}{G_{sp}^{\max} - G_{sp}^{\min}}; \quad A_2 = \frac{\eta_{br}^{\max} - \eta_{br}}{\eta_{br}^{\max} - \eta_{br}^{\min}} \quad (1)$$

gdzie:  $G_{sp}$  i  $\eta_{br}$  – bieżące wartości parametrów, według których ocenia się ekologiczność i sprawność procesu spalania;  
 $G_{sp}^{\min}$ ,  $G_{sp}^{\max}$ ,  $\eta_{br}^{\min}$ ,  $\eta_{br}^{\max}$  – minimalne i maksymalne z możliwych (odnotowanych podczas wszystkich prób) wartości odpowiednich parametrów w rozpatrywanym przedziale zmiany przestrzeni czynnikowej.

Jako uogólnione kryterium energetyczno-ekologiczne ( $A$ ), będące poszukiwaną funkcją celu, logicznie było przyjąć sumę dwóch powyższych kryteriów:

$$A = A_1 + A_2 \quad (2)$$

Ze wzorów (1) wynika, że wartości kryteriów  $A_1$  i  $A_2$  znajdują się w przedziale od 0,0 (najlepszy z możliwych tryb spalania) do 1,0 (najgorszy odnotowany wariant). Kryterium  $A$ , zgodnie ze wzorem (2), może przyjmować wartości od 0,0 (gdy optima energetyczne i ekologiczne pokrywają się) do 2,0 (skrajnie niekorzystny przypadek, gdy pokrywają się najgorsze tryby pracy kotła pod względem zarówno oszczędzania energii jak i ochrony środowiska).

### 3. Warunki eksperymentu i metodyka badań

Z wykorzystaniem wyprowadzanego wyżej pojęcia uogólnionego kryterium energetyczno-ekologicznego wykonano szereg prac doświadczalnych, które pozwoliły zdefiniować tezę o uzasadnionym podwyższeniu dopuszczalnego poziomu niedopału chemicznego przy spalaniu paliwa gazowego w kotłach. Główna część eksperymentów odbyła się w rzeczywistych warunkach eksploatacji na kotłach parowych pionowo-rurowych z palnikami wirowymi różnych typów, zapewniającymi różną intensywność zmieszania strumieni gazu i powietrza w przestrzeni paleniska. Pomiarów wykonywano według standardowych metod dokładnie opisanych w (Trembovla 1991). Określenie stężenia CO, O<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> i temperatury spalin wykonywano za pomocą analizatora spalin „TESTO-300M”. Określenie stężenia 3,4-benz(a)pirenu (C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>) w spalinach wykonywano przez uproszczoną metodę (Bezrukich 1988; Komina 1971).

W celu poszukiwania wyżej wymienionego optimum najpierw ustalano maksymalne i minimalne wartości  $G_{sp}$  i  $\eta_{br}$  przy kolejno zmieniających się wartościach nieregulowanych

czynników. Potem określano ich bieżące wartości przy danym znaczeniu regulowanego parametru (jakim był strumień objętości powietrza doprowadzanego do palników) i obliczano odpowiednie wartości kryteriów  $A_1$ ,  $A_2$  i  $A$ .

#### 4. Analiza wyników badań

Na rysunku 1 przedstawiono typowe dla wykonanych badań dane ilustrujące zależność wybranych wskaźników efektywności i ekologiczności pracy kotła od stężenia CO w spalinach. Dane otrzymano na kotle parowym o nominalnej wydajności 20 Mg/h z dwoma dwuprzepływowymi wirowymi palnikami o nominalnej mocy 8,1 MW każdy, usytuowanymi z frontu kotła na jednej osi pionowej.

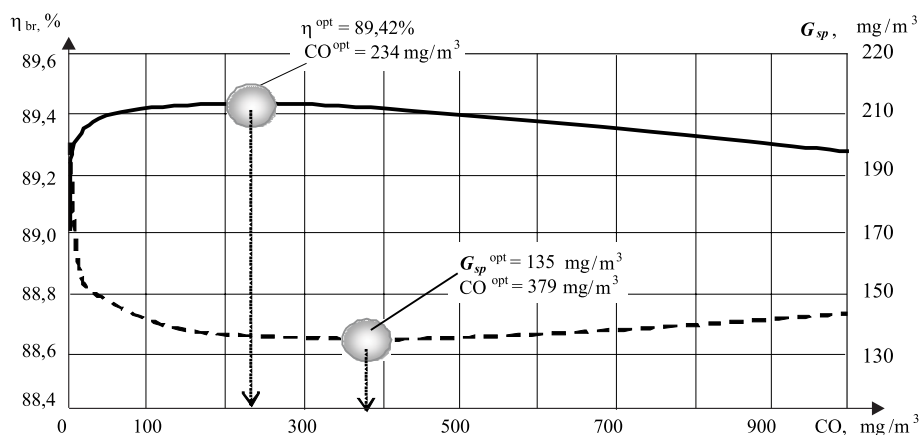
Maksymalna wartość  $\eta_{br}$  agregatu kotłowego odpowiada minimum sumy jego strat energetycznych zależnych od:

- ✧ strumienia objętości powietrza,
- ✧ strat ciepła spalinowych,
- ✧ strat od niedopału chemicznego.

Sprawność całego układu kotłowni włącza również wskaźnik zapotrzebowania energii elektrycznej do napędzania wentylatora i wyciągu spalin.

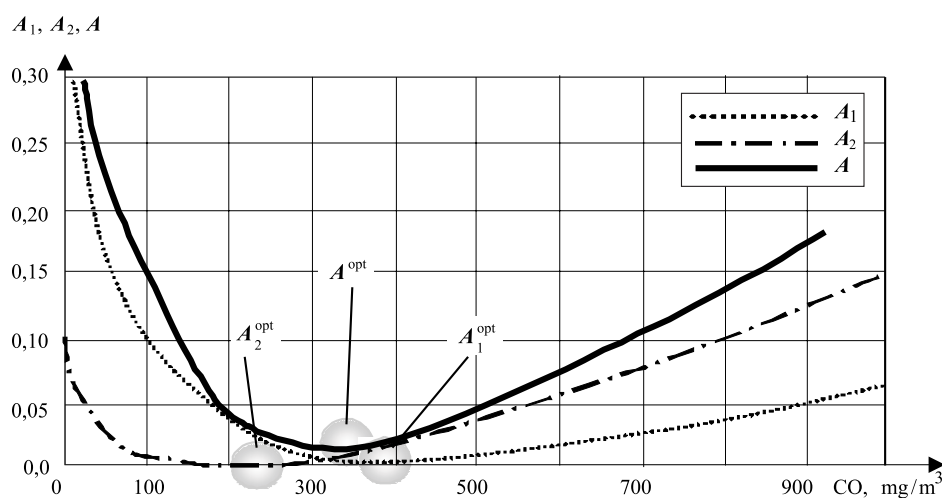
Z przedstawionych wykresów wynika, że optymalne tryby spalania znajdują się w zakresie stężenia tlenu węgla 200–400  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Zaś zbliżenie się ku strefie z pełnym spalaniem skutkuje zauważalnym obniżeniem sprawności kotła i istotnym pogorszeniem ekologicznych wskaźników spalania.

Rysunek 2 ilustruje wyniki obróbki tych samych danych według przedstawionej wyżej metody kryteriów energooszczędności i ekologiczności zużycia paliwa. Jak widać z wy-



Rys. 1. Zależność sprawności i toksyczności spalin od stężenia tlenu węgla w spalinach

Fig. 1. Dependence boiler efficiency and combustion products on the flue gas CO concentration



Rys. 2. Poszukiwanie optimum stężenia CO metodą kryteriów (warunki eksperymentu jak dla rys. 1)

Fig. 2. Search for the optimum CO concentration by the criterial method (condition for experiment the same as for Figure 1)

kresów, optima poszczególnych kryteriów  $A_1$  i  $A_2$  oraz minimalna wartość uogólnionego kryterium  $A$  znajdują się w dość wąskim przedziale zmiany stężenia CO, mianowicie 230–380  $\text{mg}/\text{m}^3$ , co z kolei odpowiada przedziałowi zmiany współczynnika nadmiaru powietrza około 0,01.

Podobne dane, nieznacznie różniące się w szczegółach, otrzymano dla innych typów kotłów i różnych palników. Należy zauważyć, że przy wzroście stężenia CO od położenia optimum wartość kryterium  $A$ , jak też samych pierwotnych wskaźników ( $G_{sp}$  i  $\eta_{br}$ ) na początku zmienia się nieznacznie. To dało możliwość uznania za „krytyczne” stężenie CO w spalinach na poziomie 500–600  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Z kolei „asekuracyjny” zapas wartości współczynnika nadmiaru powietrza, zalecany podczas nastawiania kotłów, wynosi 0,02–0,03 wartości krytycznej, co gwarantuje stałą pracę kotła w trybie zbliżonym do optimum energetyczno-ekologicznego.

Jednak wspomniany zapas stosować należy tylko na kotłach wyposażonych w tradycyjne, jeszcze dość często spotykane w kraju, układy automatyki.

Największy efekt stosowania metody regulowanego resztkowego niedopału chemicznego osiągany jest przy wykorzystaniu mikroprocesorowych systemów sterowania jakością spalania paliwa (Szarkowski i in. 2003), praca których opiera się o wyniki analizy gazowej na „bieżąco”. W tym przypadku nie ma potrzeby stosowania pojęcia „krytycznego” stężenia CO czy „asekuracyjnego” zapasu nadmiaru powietrza. Układy tego typu w sposób ciągły utrzymują tryb spalania i całej pracy kotła w strefie maksymalnie bliskiej optimum, przy tym same optimum korygowane jest w zależności od kaloryczności paliwa stanu technicznego kotła, warunków klimatycznych i innych czynników wpływu.

## Wnioski

1. Całkowity brak produktów niedopału chemicznego w spalinach bynajmniej nie świadczy o wysokiej sprawności i ekologiczności spalania paliwa w agregatach kotłowych. Maksimum sprawności, jak również minimalną toksyczność spalin w większości przypadków w praktyce nastawiania kotłów notuje się przy stężeniu CO w spalinach na poziomie 200–400 mg/m<sup>3</sup>.
2. Metoda spalania paliwa z regulowanym reszkowym niedopałem chemicznym (RRNC) na takim poziomie daje stały eksploatacyjny efekt energetyczno-ekologiczny. Przy tym sugerowany przedział RRNC jest bardzo zbliżony dla wszystkich tradycyjnych wirowych palników nadmuchowych.
3. Jako „krytyczne” stężenie CO przy wykonaniu prac nastawiania kotłów zalecana może być wartość 500 mg/m<sup>3</sup>, powyżej której obserwuje się oznaki niestabilnego spalania pulsacyjnego. W tych warunkach może znacznie wzrastać stężenie H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, 3,4-benz(a)-pirenu, formaldehydu i innych produktów niezupełnego spalania.
4. Podczas nastawiania kotłów z tradycyjnym układem automatyki (bez stałej analizy spalin) zalecana eksploatacyjna nadwyżka współczynnika nadmiaru powietrza, w porównaniu z trybem „krytycznym”, wynosi średnio 0,02–0,03.
5. Największy efekt stosowania metody RRNC osiągnąć jest przy wyposażeniu kotłów w układy automatycznej regulacji stosunku „paliwo-powietrze” na podstawie wyników stałej analizy składu spalin.

## Literatura

- BARYSZEV V.I., BIEŁOSIELSKI B.S., ZENKIEWICZ L.A., SZPOLIWSKAJA L.I., 1996 – Zmniejszenie emisji tlenków azotu za pomocą regulowanego reszkowego niedopału chemicznego. *Energetyka Ciepła* nr 4.
- BEZRUKIH V.Ju., 1988 – Dobór optymalnych parametrów mieszaniny gazowo-powietrznej w przepływowych palnikach kotłów o małej mocy w celu oszczędzania paliwa i zmniejszenia emisji szkodliwych składników. Rozprawa doktorska. Leningrad, LISI.
- KOMINA G.P., 1971 – Badanie produktów spalania gazów węglowodorowych i zmniejszenie w nich szkodliwych składników. Rozprawa doktorska. Leningrad, LISI.
- NOVIKOV O.N., ARTAMONOV D.G., SZKAROWSKI A.L. i in., 2000 – Energetyczno-ekologiczna optymalizacja spalania paliwa w kotłach i piecach przez regulację stosunku „paliwo-powietrze”. *Energetyka Przemysłowa* nr 5.
- TREMOVLA V.I., FINGER E.D., AVDIEJEVA A.A., 1991 – Ciepło techniczne próby zespołów kotłowych. Moskwa, Ergoatomizdat.
- SIGAL I.Ja., 1988 – Ochrona środowiska powietrznego przy spalaniu paliwa. Leningrad, Nedra.
- SZKAROWSKI A., 1999 – Ocena współczesnych tendencji zanieczyszczenia środowiska naturalnego. W: *Rocznik Ochrony Środowiska*. Koszalin, tom 1.

SZKAROWSKI A., NOWIKOW O.N., OKATJEW A.N., KOCIERGIN M.A., 2003 – Intelktualny system sterowania jakością spalania paliwa. W: Kompleksowe i szczegółowe problemy ochrony środowiska, IV Ogólnopolska Konferencja Naukowa, Koszalin–Ustronie Morskie.

Aleksander SZKAROWSKI, Sylwia JANTA-LIPIŃSKA

## Fuel combustion optimizing by regulated level of chemical underburn

### Abstract

Variety of energy–ecology optimizing means that optimum result of fuel combustion is focused not only on direct efficiency of its usage but also on minimum environmental damage.

Best possible fuel combustion connected with controlled level of chemical underburn is considered to be one of the simplest, cheapest and the most effective methods of optimizing.

It is essential to notice that the meaning of common statement that minimum underburn responds to maximum efficiency of fuel combustion in boilers is undoubtedly incorrect.

Radiation as well as convection heat reclaiming by screen surfaces surrounding boiler's firing depends on (in a very complicated way) various features: form, size, flames shining, location of maximum temperatures area and also on the shape of firing space aerodynamics.

Standardized balance boiler's tests show that maximum efficiency can be mentioned with highly noticeable chemical underburn responding to concentration 0.02–0.03% level of volume (200–300 ppm).

What is more, nitrogen oxide, which originates in maximum temperature (with lack of underburn), is 35 times more toxic than carbon monoxide.

It can be supposed that defining the permissible level of chemical underburn is a typical optimizing issue due to minimize the destination function.

The issue should be resolved individually in every specific area of boiler's adjustment, with accounting such features as precise characteristics and details of firing – boiling set. That is why the optimizing issue is recognized to be really complicated and complex.

To simplify and unify the issue, ecological and economical fuel combustion criteria were proposed as well as general energy–ecology criterion, which is simultaneously the searched destination function.

Results of such research on boilers have shown that optimum combustion operation takes place within carbon monoxide concentration of 200–400 ppm. Automatic regulation of chemical combustion on such level results in a constant utilizing energy–ecology effect.

KEY WORDS: optimisation, combustion, chemical underburn, energy-ecological criterion, boiler, flue gases analyzer