



Badania doświadczalne a dokładność opracowanego modelu

Aleksander Szkarowski, Sylwia Janta-Lipińska
Politechnika Koszalińska

1. Wstęp

Dość często z powodu obszernego zakresu badań eksperymentalnych, bez pogorszenia wiarygodności zakładanych przez nas założeń badawczych poszukuje się drogi, która skróciłaby nasz czas pracy i zmniejszyła liczbę pomiarów. Znanym sposobem na to jest metoda planowania eksperymentów. Drugim takim rozwiązaniem okazuje się opracowanie teoretycznego modelu fizyko-matematycznego. Taką też drogę wykorzystuje w swojej pracy badawczej zespół autorów.

W ramach prowadzonych prac doświadczalnych zespół autorów zajmował się w głównej mierze modernizacją kotłów przemysłowych i grzewczych w celu poprawy wskaźników ich pracy pod względem sprawności, jak i ekologiczności. Realizując kolejny etap takich badań opracowane zostały zasady polioptymalizacji procesu spalania paliwa według energo-ekologicznego kryterium [4].

W tym celu zaprojektowany został i wykonany mikroprocesorowy system automatycznego sterowania jakością spalania paliwa [3]. Na bazie tego systemu zbudowano stanowisko eksperymentalne do badań jakości spalania paliwa zgodnie z założeniami powyższego kryterium. Badania wykonywano na rzeczywistych obiektach firmy URAN SPB oraz TERA, wyposażonych w kotły parowe o wydajnościach od 6 do 25 t/h. W celu skrócenia drogi poszukiwania wieloczynnikowego optimum jakości spalania paliwa oraz definitywnego zmniejszenia liczby eksperymentów zaproponowany został nowy model fizyko-matematyczny [5].

2. Cele badań

Celem opracowania modelu fizyko-matematycznego było uzyskanie sposobu określenia przedziału, w którym oczekuje się optymalnych wartości następujących wskaźników sprawności i ekologiczności spalania paliwa:

- temperatury spalin wzdłuż traktu spalinowego t_{sp} ;
- sprawności kotła (lub agregatu kotłowego) netto η_n ;
- stężenia tlenku węgla CO i tlenków azotu NO_x w spalinach;
- mocy zużywanej przez silnik wentylatora nadmuchowego, w postaci natężenia prądu I_w oraz współczynnika mocy $\cos\varphi_w$;
- mocy zużywanej przez silnik wentylatora wyciągowego (I_{wy} , $\cos\varphi_{wy}$).

Model powinien zapewnić wykonywanie swych zadań w zakresie możliwych zmian następujących czynników wpływu [5]:

- zużycia paliwa B_g ;
- współczynnika nadmiaru powietrza w palenisku α_p ;
- zmiany współczynnika nadmiaru powietrza na skutek nieszczelności $\Delta\alpha_i$;
- temperatury powietrza t_p i paliwa t_g ;
- wartości opalowej paliwa Q_d ;
- stopnia zanieczyszczenia ekranowych powierzchni kotła;
- sprawności cieplnej konwekcyjnych powierzchni kotła.

Największy problem w trakcie opracowywania modelu stanowiło określenie zmian stężenia CO i NO_2 w zależności od czynników wpływu. Analiza literatury naukowo-technicznej w tym zakresie [1, 7–9] świadczy o skrajnie skomplikowanym charakterze zagadnienia opracowania uniwersalnego modelu fizyko-matematycznego zmiany stężenia CO i NO_2 z uwzględnieniem kinetyki pośrednich i końcowych produktów reakcji spalania. Większość uzyskanych w ten sposób metod posiada ograniczoną dokładność, w związku z czym nie może być stosowana do rozwiązania zdefiniowanego zagadnienia.

Opracowanie modelu matematycznego polegało na analizie zmian czynników wpływu na wartości wskaźników określających jakość spalania paliwa oraz wskaźników pracy palników; aproksymacji danych doświadczalnych i ustaleniu stopnia adekwatności uzyskanych modeli.

Za pomocą opracowanego modelu fizyko-matematycznego zostały następnie wykonane obszernie badania w zakresie sprawności i ekologiczności spalania paliwa w wybranym rodzaju techniki cieplnej: ustalenie wpływu typu palników i ich usytuowania na froncie kotła, mocy kotła, jego stanu technicznego oraz trybu spalania paliwa. Za pomocą stworzonego modelu dokonywano oceny optymalności spalania z punktu widzenia zarówno sprawności jak i ekologiczności dokonywanej na podstawie opracowanego przez autorów kryterium energo-ekologicznego. Podstawowymi czynnikami określającymi wartość kryterium był zredukowany wskaźnik toksyczności oraz bilansowa sprawność zespołu kotłowego.

Wykorzystanie modelu pozwoliło znacznie zmniejszyć liczbę wymaganych zmian trybu pracy kotłów i prowadzonych pomiarów na rzeczywistych obiektach przemysłowo-grzewczych.

3. Wyniki badań

Podczas prac doświadczalnych zbadano wpływ ilościowych i jakościowych wskaźników dostarczania powietrza do strefy spalania, a także mocy kotła na emisję CO i NO_x [2]. Ważne znaczenie miał także rodzaj palników. Dlatego badania prowadzone były na jednakowych kotłach parowych typu DKVR-20-13 wyposażonych w różne palniki nadmuchowe: GMGB-5,6, GMGm-5 oraz GMG-7.

Uzyskane wyniki badań doświadczalnych na bieżąco zestawiano z opracowanym wcześniej modelem matematycznym w celu określenia stopnia adekwatności uzyskanych wyników.

Według [6] wiarygodność modelu matematycznego sprawdza się na podstawie kryteriów zgodności. Jako takie kryterium autorzy wybrali kryterium korelacji Pearsona, a właściwie jego kwadrat – r^2 (tzw. współczynnik determinacji). Za wiarygodną zależność aproksymującą, która opisywała dane doświadczalne, przyjmowano funkcję posiadającą r^2 powyżej 0,95. Ogólny widok funkcji aproksymujących dane pomiarów stężenia CO i NO₂ w zależności od α_p i B_g , dla palników typu GMGm-5, GMGB-5,6, GMG-7, podano we wzorach (1) i (2), natomiast odpowiednie współczynniki aproksymacji podano w tabeli 1 i 2.

$$\text{CO} = \frac{a + b \cdot \alpha_p + c \cdot B_g}{1 + d \cdot \alpha_p + e \cdot B_g + f \cdot B_g^2} \quad (1)$$

$$\text{NO}_2 = \frac{a + b \cdot \alpha_p + c \cdot B_g}{1 + d \cdot \alpha_p + e \cdot \alpha_p^2 + f \cdot B_g} \quad (2)$$

Tabela 1. Współczynniki aproksymacji zależności CO = $f(\alpha_p, B_g)$ **Table 1.** Approximation coefficients in dependence of CO = $f(\alpha_p, B_g)$

Współczynniki do określania CO	3×GMGB-5,6	3×GMGm-5	2×GMG-7
<i>a</i>	-161,49	-285,39	-273,77
<i>b</i>	144,44	228,71	207,88
<i>c</i>	0,007700	0,023335	0,026841
<i>d</i>	-1	-0,9571	-0,81543
<i>e</i>	$-8,3 \cdot 10^{-6}$	$1,018 \cdot 10^{-5}$	-0,00019
<i>f</i>	$3,89 \cdot 10^{-9}$	$-1,049 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$
Współczynnik determinacji	0,998	0,991	0,988

Tabela 2. Współczynniki aproksymacji zależności NO₂ = $f(\alpha_p, B_g)$ **Table 2.** Approximation coefficients in dependence of NO₂ = $f(\alpha_p, B_g)$

Współczynniki do określania NO ₂	3×GMGB-5,6	3×GMGm-5	2×GMG-7
<i>a</i>	19,274	-26,6	-19,31
<i>b</i>	-17,725	24,5	16,66
<i>c</i>	0,00712	0,00183	0,00406
<i>d</i>	1,61	-1,75	-1,69
<i>e</i>	0,659	0,8	0,741
<i>f</i>	$5,522 \cdot 10^{-6}$	$-1,233 \cdot 10^{-5}$	$-3,760 \cdot 10^{-7}$
Współczynnik determinacji	0,989	0,987	0,968

Zależności zmiany I_w , I_{wy} , $\cos\phi_w$, $\cos\phi_{wy}$, aproksymujące doświadczalne dane dla wentylatora nadmuchowego BDN-11,2 i wentylatora wyciągowego DN-13,5, przedstawiono w postaci funkcji wielomianowej trzeciego rzędu we wzorach (3)–(6), natomiast odpowiednie wielkości współczynników wielomianu podano w tabeli 3.

$$I_w = a + b \cdot V_p + c \cdot V_p^2 + d \cdot V_p^3 \quad (3)$$

$$\cos\phi_w = a + b \cdot V_p + c \cdot V_p^2 + d \cdot V_p^3 \quad (4)$$

$$I_{wy} = a + b \cdot V_g + c \cdot V_g^2 + d \cdot V_g^3 \quad (5)$$

$$\cos \varphi_{wy} = a + b \cdot V_g + c \cdot V_g^2 + d \cdot V_g^3 \quad (6)$$

gdzie:

I_w, I_{wy} – prąd zużywany na napęd wentylatora nadmuchowego i wyciągowego [A];

$\cos \varphi_w, \cos \varphi_{wy}$ – współczynnik mocy wentylatora nadmuchowego i wyciągowego [j. u.];

α_p – współczynnik nadmiaru powietrza w palenisku [j. u.];

B_g – zużycie gazu [m^3/h];

V_p – zużycie powietrza, [m^3];

V_g – strumień objętości gazów spalinowych [m^3/m^3];

a, b, c, d, e, f – współczynniki modelu matematycznego [j. u.].

Tabela 3. Współczynniki wielomianów przy określaniu $I_w, I_{wy}, \cos \varphi_w, \cos \varphi_{wy}$
Tabela 3. Polynomial coefficients in defining $I_w, I_{wy}, \cos \varphi_w, \cos \varphi_{wy}$

Współczynniki	I_w	I_{wy}	$\cos \varphi_w$	$\cos \varphi_{wy}$
a	-12,2	9,2	0,056	0,083
b	0,0116	0,074	0,00017	$1,32 \cdot 10^{-4}$
c	10^{-6}	$-6,332 \cdot 10^{-7}$	$-1,484 \cdot 10^{-8}$	$1,249 \cdot 10^{-8}$
d	$2,9 \cdot 10^{-11}$	$1,887 \cdot 10^{-11}$	$4,29 \cdot 10^{-13}$	$3,962 \cdot 10^{-13}$
Współczynnik determinacji	0,987	0,991	0,963	0,949

Aproksymując zależności do określania $I_w, I_{wy}, \cos \varphi_w, \cos \varphi_{wy}$ pokazano, że wraz ze wzrostem mocy i zwiększeniem objętości gazów spalinowych zwiększa się ich temperatura, a zatem temperatura t_g pośrednio uwzględniana jest przy określaniu strat energii na nadmuch i wyciąg spalin. Uwzględniając, że palniki i krótkie odcinki przewodów można ujmować jako opory miejscowe, ogólne zależności przepływu gazu B_g i powietrza V_p przez kontrolne odcinki od spadku ciśnień powietrza $\Delta P_p = P_p - P_{pal}^p$ i gazu $\Delta P_g = P_g - P_{pal}^g$ między kontrolnym punktem a paleniskiem będą miały postać:

$$V_p = A_p \cdot \Delta P_p^{0,5} \quad (7)$$

$$B_g = A_p \cdot \Delta P_g^{0,5} \quad (8)$$

gdzie:

P_p – ciśnienie powietrza w punkcie kontrolnym [Pa];

P_g – ciśnienie gazu w punkcie kontrolnym [Pa];

P_{pal}^p, P_{pal}^g – ciśnienie odpowiednio powietrza i gazu w palenisku [Pa];

$\Delta P_p, \Delta P_g$ – spadek ciśnienia odpowiednio powietrza i gazu [Pa];

A_p – współczynnik przepływu palnika [j. u.].

Dla badanych rodzajów palników typu GMG i GMGm aproksymacja doświadczalnych danych według wzoru (7) nie dała pozytywnych wyników, co spowodowane było dwupotokowym schematem ruchu powietrza w palniku. Dlatego też pomiar ciśnienia powietrza wykonywano za wentylatorem. Otrzymane współczynniki aproksymacji dla wariantów wyposażenia kotłów w palniki 2×GMG-7, 3×GMGm-5, 3×GMGB-5,6 podano w tabeli 4.

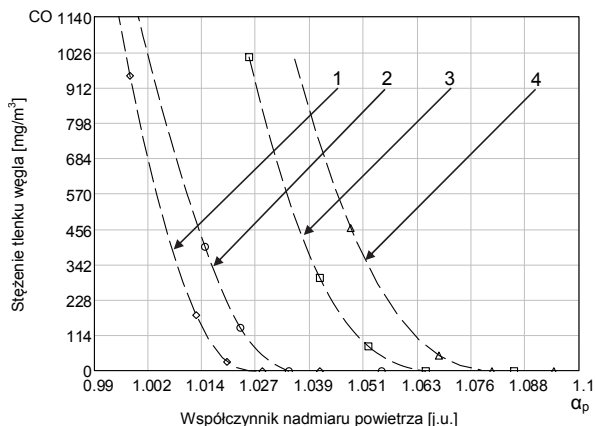
Tabela 4. Wartość współczynnika A_p w zależnościach (7) i (8)

Table 4. Value of coefficient A_p in equations (7) and (8)

Wartość współczynnika	3×GMGB-5,6	3×GMGm-5	2×GMG-7
A_p we wzorze (8)	88,365	119,14	121,08
Współczynnik determinacji	0,987	0,991	0,988
A_p we wzorze (7)	2213,02	2007,31	1991,65
Współczynnik determinacji	0,975	0,991	0,937

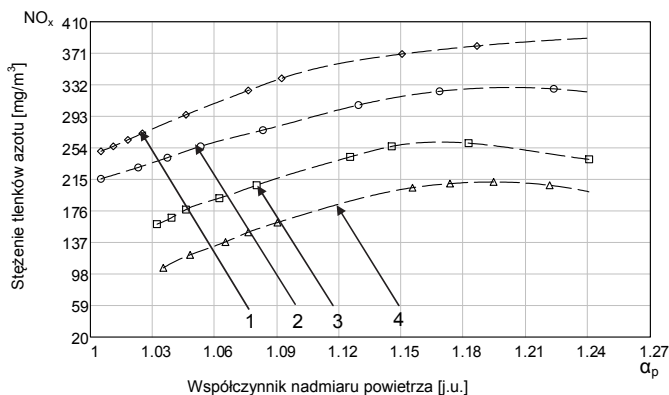
4. Wykorzystanie wyników

Uzyskane wyniki badań dla palników typu GMGB-5,6 oraz GMGm-5 dla dwóch różnych obciążeń kotła wraz z wykorzystaniem opracowanego modelu przedstawiono na poniższych wykresach. Punkty na poszczególnych wykresach obrazują wyniki uzyskane w trakcie badań doświadczalnych, natomiast linie przerywane to krzywe uzyskane poprzez aproksymację danych doświadczalnych za pomocą opracowanego modelu matematycznego.



Rys. 1. Zależność stężenia CO w spalinach od rodzaju palnika, współczynnika nadmiaru powietrza i obciążenia kotła: 1 i 2 – palnik GMGB-5,6: 1 – obciążenie 100%; 2 – 87%; 3 i 4 – palnik GMGm-5: 3 – 110%; 4 – 100%

Fig. 1. CO emission in exhaust fumes in dependence of burner type, surplus air coefficient and boiler's load: 1 and 2 – burner GMGB-5,6: 1 – load 100%; 2 – 87%; 3 and 4 – burner GMGm-5: 3 – 110%; 4 – 100%



Rys. 2. Zależność stężenia NO_x w spalinach od rodzaju palnika, współczynnika nadmiaru powietrza i obciążenia kotła: 1 i 2 – palnik GMGB-5,6: 1 – obciążenie 100%; 2 – 87%; 3 i 4 – palnik GMGm-5: 3 – 110%; 4 – 100%

Fig. 2. NO_x emission in exhaust fumes in dependence of burner type, surplus air coefficient and boiler's load: 1 and 2 – burner GMGB-5,6: 1 – load 100%; 2 – 87%; 3 and 4 – burner GMGm-5: 3 – 110%; 4 – 100%

5. Wnioski

Celem badań doświadczalnych wykonywanych za pomocą modelu matematycznego było ustalenie charakteru wpływu nieregulowanych czynników na optymalne wartości ciśnienia powietrza przed palnikiem, stężenia tlenu oraz tlenku węgla. Aproksymację doświadczalnych danych CO i NO_x w funkcji $f(\alpha_p, B_g)$ w postaci zależności algebraicznych dokonano za pomocą pakietu programów stosowanych „Table Curie-3D”. Zależności aproksymujące wyprowadzono dla warunków odpowiadających warunkom eksperymentów. W celu uwzględnienia wpływu zewnętrznych czynników na otrzymane wartości wprowadzono poprawki na następujące wartości:

- zmianę współczynnika nadmiaru powietrza na skutek zasysania przez nieszczelności do paleniska;
- zmianę przepływu powietrza lub gazu w przypadku zmiany ich temperatury.

Literatura

1. Акимченко Е. М., Каган Р. Г.: *Опыт эксплуатации горелок ГМГ на котлах типа ДКВР*, Газовая промышленность. 10(1), 31–33 (1970).
2. Kalicka Z., Jerzak W., Kawecka Cebula E.: *The Effect of combustion of natural gas with 21–29% O₂/CO₂/N₂ mixtures on emission of carbon monoxide*. Archives of Environmental Protection. 39(4), 93–103 (2013).
3. Szkarowski A., Janta-Lipińska S.: *Automatyczne sterowanie jakością spalania paliwa stałego w kotłach przemysłowo-grzewczych*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection). 11, 241–257 (2009).
4. Szkarowski A., Janta-Lipińska S.: *Optymalizacja pracy kotłów metodą sterowanego poziomu niezupełności spalania*. Polityka energetyczna. 12(1), 129–137 (2009).
5. Szkarowski A., Janta-Lipińska S.: *Modelowanie optymalnego spalania w kotłach przemysłowo-grzewczych*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection). 13, 511–525 (2011).
6. Розенфельд Э.И.: *Сжигание газа и мазута с минимальным выбросом продуктов неполного сгорания*. ВИНТИ. Сер. "Топлив. баланс" 1980.
7. Романов А. К.: *Микропроцессорная техника – основа автоматизации народного хозяйства*, Микропроцессорные средства и системы. 1(1), 3–5 (1984).
8. Росляков П. В., Егорова Л. Е.: *Влияние основных характеристик зоны активного горения на выход оксидов азота*, Теплоэнергетика. 9(1), 22–26 (1996).

9. Ротац В.Я.: *Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами*, М.: Энергоатомиздат 1985.

Experimental Research Vs. Accuracy of the Elaborated Model

Abstract

For an extensive range of experimental studies one is constantly looking for the way which would shorten our worktime as well as decrease the amount of measurements and at the same time not worsen the credibility of set research assumptions. One way is the method of planning experiments or elaborating a theoretical physico-mathematical model. The authors' team decided to elaborate a new physico-mathematical model, as a work line, which determined the range of optimal values for efficiency and ecology ratio of fuel combustion.

While conducting the experimental research the authors' team dealt mainly with the modernization of industrial boilers and heaters to improve their operation ratio in respect of efficiency and ecology. Thanks to the created model the assessment of combustion optimality was performed from the viewpoint of both efficiency and ecology made on the basis of energo-ecological criteria elaborated by the authors.

The use of model allowed the authors to considerably decrease the amount of required work mode change of boilers and conducted measurements on real industrial-heating objects. The studies were performed on the real objects of URAN SPB and TERA companies. During the experimental works one examined the influence of quantitative and qualitative ratio of distributing the air into combustion zone as well as boiler power on the emission of CO and NO_x. The studies were conducted on identical steam boilers DKVR-20-13 equipped with various fan burners: GMGB-5,6, GMGm-5 and GMG-7. The achieved results of experimental research were set with the previously elaborated mathematical model in order to determine the adequacy rate of achieved results (fig. 1–2). The credible approximating dependence that determined the experimental data was made up by the function including the determination coefficient above 0.95. The values of approximating factors for the particular measurements were set in the table (1–4).

Słowa kluczowe:

modelowanie naukowe, aproksymacja, stężenie, spalania, badania naukowe

Keywords:

scientific modeling, approximation, concentration, combustion, scientific research