

# Model matematyczny procesów ciepłno-przepływowych w kanałach grzewczych baterii koksowniczej PWR-63

Mathematical formula for thermal and flow processes in heating flues of PWR-63 coke oven battery

dr inż. Jacek SMOŁKA, mgr inż. Łukasz SŁUPIK



## W KILKU SŁOWACH

W niniejszym artykule przedstawiono model matematyczny niestabilnych procesów cieplnych i przepływowych zachodzących podczas rewersyjnego spalania gazu w kanałach grzewczych baterii koksowniczej typu PWR-63. Model matematyczny został opracowany w Instytucie Chemicznej Przeróbki Węgla (ICHPW) w Zabrze w ramach projektu Inteligentna Koksownia.



## ABSTRACT

The following article proposes a mathematical formula for transient thermal and flow processes observed in reverse combustion of gases that takes place in the heating flues of PWR-63 coke oven battery. The formula was devised at the Institute for Chemical Processing of Coal (ICHPW) in Zabrze as a part of the Inteligentna Koksownia (Smart Coke Plant) project.

Rosnące wymagania w procesie produkcji koksu, zarówno w stosunku do jego jakości, jak i energochłonności całego procesu oraz jego niekorzystnego oddziaływania na środowisko naturalne, wywołały szeroki rozwój systemów kontroli i automatycznego sterowania jego przebiegiem. Obecnie w ICHPW trwają prace nad zintegrowanym systemem nadrzędnego sterowania pracą baterii koksowniczej na poziomach: technicznym, technologicznym oraz ekologicznym. Jednym z niezbędnych elementów tego systemu jest program symulujący proces koksowania, który pracuje na podstawie danych uzyskanych ze sprzężonego numerycznego modelu matematycznego opisującego wymianę ciepła i masy w oraz pomiędzy komorami koksowniczymi i sąsiadującymi z nimi kanałami grzewczymi.

W tym artykule opisano wyłącznie pracę kanałów grzewczych, która jest dość skomplikowana do zamodelowania, dlatego też konieczna jest szczegółowa znajomość sposobu

przewodzenia procesu opalania ścian komór grzewczych. Najważniejsze cechy procesu, które powinien uwzględnić model matematyczny, są następujące:

- opalenie gazem koksowniczym o znanym składzie, podwyższonej temperaturze i strumieniu masowym,
- wykorzystanie powietrza do spalania o znanym strumieniu masowym wynikającym z założonego w procesie stosunku nadmiaru powietrza i o podwyższonej temperaturze wskutek współpracy z regeneratorem,
- wymiana ciepła między kanałem a dwoma komorami koksowniczymi odbywająca się w sposób ciągły w kilkunastogodzinnych cyklach, które są w tych komorach przesunięte względem siebie,
- opalenie ścian komór odbywające się w sposób rewersyjny w cyklach kilkunastominutowych.

W związku z tym do budowy tego symulatora poszukiwano modelu ściślej odwzorowującego pracę kanału grzewczego. Najbardziej obiecującą techniką, z uwagi na możliwość budowania modeli komputerowych procesów ciepłno-przepływowych w kanałach grzewczych, jest obecnie technika obliczeniowa wykorzystująca numeryczną mechanikę płynów (ang. Computational Fluid Dynamics - CFD) [1, 2].

Model CFD opisujący pracę kanałów grzewczych powinien uwzględniać następujące elementy:

- dokładną geometryczną reprezentację układu przepływowego wewnątrz kanału grzewczego z odpowiednią dyskretyzacją całego obszaru obliczeniowego,
- zestaw równań opisujący silnie niestacjonarny proces opalania komór koksowniczych za po-

dr inż. Jacek Smolka  
Instytut Techniki Ciepłej,  
Politechnika Śląska  
Konarskiego 22, 44-100  
Gliwice  
e-mail: jacek.smolka@polsl.pl

mgr inż. Łukasz Słupik  
Instytut Chemicznej Przeróbki  
Węgla  
Zamkowa 1, 41-803 Zabrze  
e-mail: lsłupik@ichpw.  
zabrze.pl



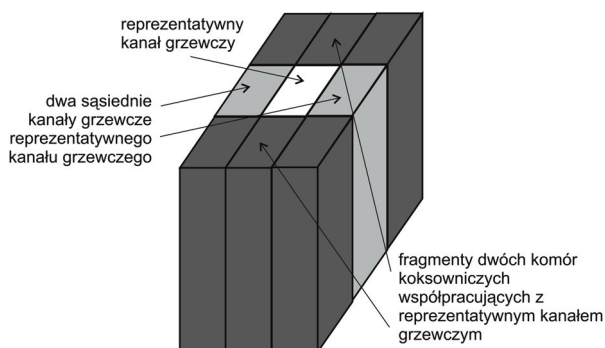


mocą gazu koksowniczego,

- objętościowe źródła ciepła wynikające z modelowanych reakcji chemicznych dla spalane-go paliwa,
- właściwości materiałowe w funkcji temperatu-ry zarówno dla krzemionki stanowiącej mate-riał ścian oraz kształtek jak i gazów znajdujących się w kanale grzewczym,
- warunki brzegowe, spośród których najważ-niejsze opisują niestacjonarne zapotrzebo-wanie na ciepło dla obu ścian komór koksow-nicznych współpracujących z kanałem oraz niestacjonarną temperaturę powietrza wy-korzystywanego do spalania na skutek pracy regeneratora zasilanego spalinami pochodzą-cymi z kanału.

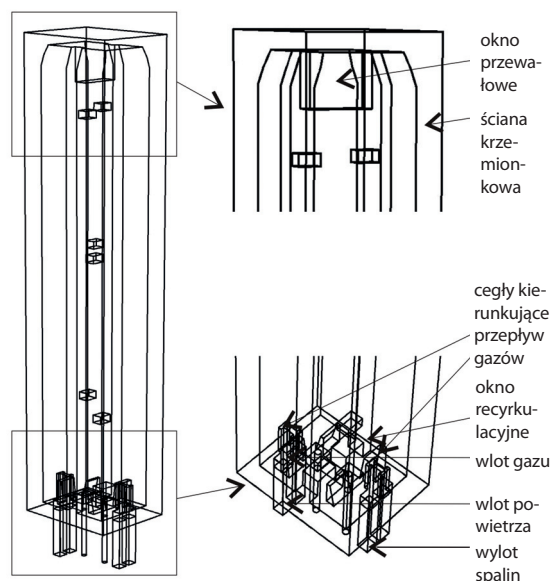
W następnym kroku budowania modelu CFD procesów ciepłno przepływowych w kanałach grzewczych baterii koksowniczych przyjęto po-niższe podstawowe założenia:

- przedmiotem rozważań jest pojedynczy kanał grzewczy baterii koksowniczej PWR-63, sąsia-dujący z dwiema komorami koksowniczymi, co schematycznie pokazano na rys. 1,
- rozpatrywany jest 15 godzinny cykl koksowa-nia, podczas którego ciepło dostarczane jest do dwóch sąsiadujących z kanałem komór koksowniczych, do których ładunek węgla następuje z interwałem 7,5 godziny.
- model matematyczny kanałów uwzględnia re-wersyjne spalanie gazu co 21 min.
- oddziaływanie kanałów grzewczych z komorą koksowniczą są symulowane poprzez znany uśredniony rozkład strumienia ciepła w czasie procesu koksowania
- spalanie odbywa się w podgrzany do tem-peratury ok. 1000-1100°C powietrzu atmosferycznym.



Rys. 1. Schemat modelu kanału grzewczego współpracującego z innymi kanałami oraz fragmentem dwóch ścian komór koksowniczych

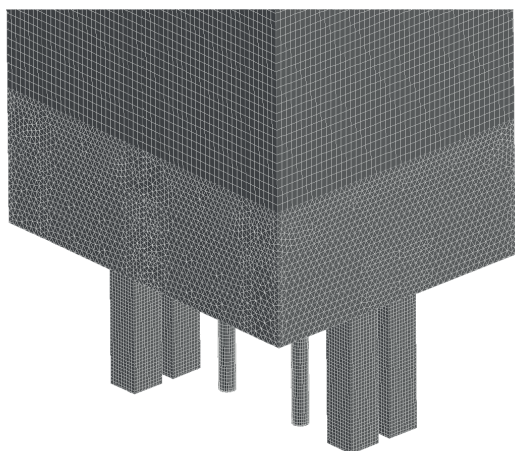
Budowę modelu rozpoczęto od przygotowa-nia szczegółowej geometrii kanału grzewczego w oparciu o dokumentację techniczną baterii koksowniczej PWR-63. Typowa postać trójwymia-rowego modelu geometrycznego z zaznaczo-nymi podstawowymi elementami jest przedsta-wiona na rys. 2. Model zawiera kanały dolotowe gazu i powietrza, które znajdują się w podstawie kanału. Jednocześnie w modelu geometrycznym uwzględniono podstawowe jego elementy takie jak: okno w przewale w okolicach stropu, okno recyrkulacyjne przy podstawie, ściany o grubości cegieł krzemionkowych, a także cegły wewnątrz kanału kształtujące przepływ gazów po wypływie z kanałów dolotowych powietrza i paliwa oraz cegły kierujące przepływ spalin przepływających przez okno recyrkulacyjne. Dodatkowo w górnej części kanału przekrój poprzeczny kanału nie jest stały i osiąga swoją minimalną wartość tuż nad oknem przewalowym.



Rys. 2. Trójwymiarowy model geometryczny kanału grzewczego.

W tej geometrii kanału grzewczego wygene-rowana została siatka, która zawierała prawie 1,5 mln hybrydowych elementów. W obszarze komo-ry mieszania do wysokości cegieł kształtujących przepływ spalin wygenerowano siatkę typu TET, natomiast powyżej oraz w kanałach dolotowych i wylotowych powietrza, gazu i spalin wyłącznie elementy typu HEX. W ten sposób siatka posiada elementy bardzo wysokiej jakości. Fragment siatki w dolnej części kanału pokazano rysunku 3.





Rys. 3. Fragment siatki numerycznej w dolnej części kanału grzewczego

Podstawowe równania wykorzystywane przy sformułowaniu modelu procesów ciepło-przebiegowych zachodzących w kanałach grzewczych są równaniami transportu, które ze względu na charakter procesu opalania zostały sformułowane w stanie nieustalonym [1]. W związku z tym rozwiązano następujące równania:

- energii,
- promieniowania cieplnego,
- ciągłości,
- zachowania pędu,
- udziałów poszczególnych gazów składowych występujących w procesie spalania do wyznaczenia ich stężeń (liczba tych równań jest zależna od składu gazu spalanego w powietrzu),
- turbulencji.

Oprócz przedstawionych równań dodatkowo wskazano mechanizm spalania gazu koksowniczego. W tym celu został wykorzystany model oparty głównie o proces mieszania paliwa z powietrzem (ang. Eddy Dissipation Model). W modelu zdefiniowano zestaw reakcji chemicznych, według których przeprowadzony jest proces spalania. Przy założeniu typowego składu gazu koksowniczego, który zawiera takie składniki jak  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_3\text{H}_6$  oraz  $\text{C}_6\text{H}_6$ , zastosowano dwustopniowy mechanizm proces redukcji składników palnych.

W wymienionych równaniach opisujących proces spalania gazu koksowniczego pojawiają się następujące właściwości materiałowe dla gazów oraz ścian w kanale grzewczym:

- gęstość,
- ciepło właściwe,

- współczynnik przewodzenia ciepła,
- lepkość dynamiczna,
- współczynnik absorpcji,
- współczynnik dyfuzji.

W związku z tym właściwości gazu przepływającego przez kanał powinny być określane w funkcji temperatury dla każdego ze składników z osobna, a następnie odpowiednio uśredniane dla ich mieszaniny. Gęstość gazu, ze względu na niewielkie zmiany ciśnień wzdłuż drogi ich przepływu, można określić z modelu gazu doskonałego nieściśliwego dla mieszaniny, bez potrzeby wykorzystywania modelu gazu ściśliwego. Wartość ciepła właściwego, współczynnika przewodzenia ciepła i lepkości dynamicznej dla danej temperatury uzyskuje się po uśrednieniu proporcjonalnie do masowego udziału poszczególnych składników spalin. Wielkości te dla poszczególnych składników w formie wielomianowych funkcji temperatury zdefiniowane są zarówno w literaturze i w bazach oprogramowania CFD. Model promieniowania DO wymaga zdefiniowania współczynnika absorpcji. Do jego określenia można wykorzystać model ważonej sumy gazów szarych, dla którego ten współczynnik zależy od lokalnych wartości udziałów składników mieszaniny gazów oraz lokalnej temperatury. Dla określenia współczynnika dyfuzji opracowano kilka modeli, z których najbardziej zaawansowany jest model multi-component [3]. W tym modelu współczynnik dyfuzji dla każdego ze składników jest molowo uśredniany na podstawie wartości współczynników binarnych, przy czym współczynniki binarne wyznacza się dla wszystkich par składników w danej temperaturze lub w oparciu o wielomianowe funkcje temperatury. Podobnie postąpiono przy definiowaniu właściwości dla krzemionki, z której wykonana jest całość obmużra modelowanego kanału grzewczego, tzn. gęstość, ciepło właściwe i współczynnik przewodzenia ciepła były zależne od temperatury.

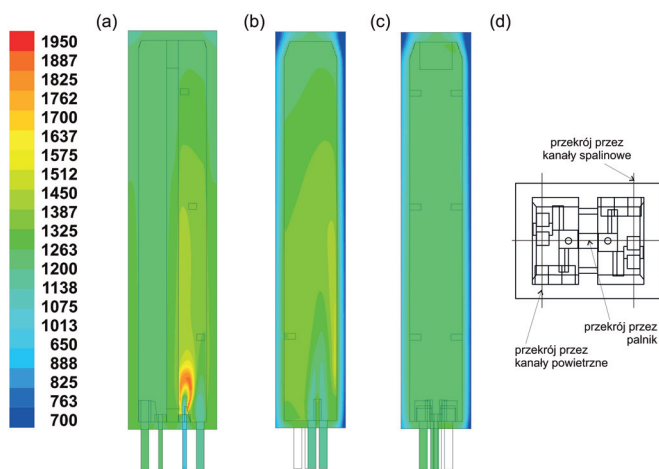
Zaproponowany model matematyczny wprowadzono do pakietu Ansys Fluent. Po rozwiązaniu opisanych wyżej równań transportu otrzymano wyniki, których przykładowe rozkłady temperatury, modułu wektora prędkości, wektorów prędkości oraz udziałów molowych tlenu i dwutlenku węgla w trzech przekrojach kanału grzewczego przez jego palnik, kanały dolotowe oraz kanały wylotowe pokazano na rysunkach





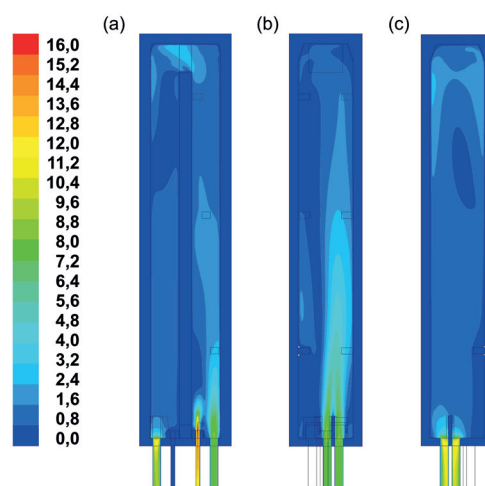
4-7. Te wyniki zarejestrowano bezpośrednio po zmianie kierunku opalania (rewersji) po 3,5 h od momentu zasypania jednej z komór. Położenie płaszczyzn, na których widoczne są wyniki, pokazano na rysunku 4(d).

Jak wynika z rysunku 4, najniższą temperaturą w modelu jest temperatura gazu w kanale dolotowym, a najwyższą temperatura płomienia po zapłonie mieszanki paliwowo-powietrznej. Poza tym w obu ciągach kanału wyraźnie widać znaczące różnice w temperaturach spalin, które sięgają ok. 200 K. W ciągu wznosnym gradienty temperatury są znaczne ze względu na obecność płomienia, natomiast w ciągu opadającym temperatura dość wyrównana. Warto również zwrócić uwagę na bardzo duże spadki temperatury w samych ścianach kanału.

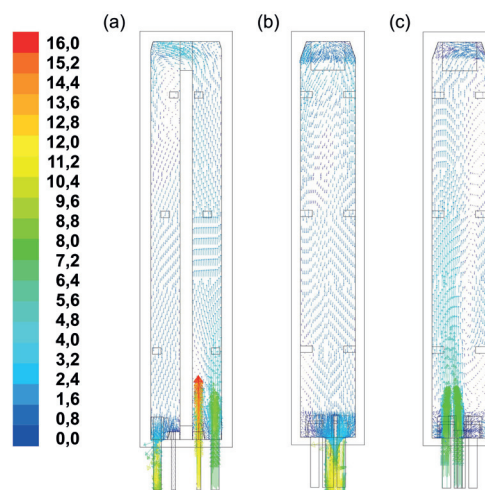


Rys. 4. Rozkład temperatury (K) bezpośrednio po rewersji po 3,5 h od rozpoczęcia cyklu koksowania w trzech przekrojach przez (a) palnik, (b) kanały dolotowe powietrza oraz (c) kanały wylotowe spalin.

Na rysunkach 5-6 przedstawiono pole prędkości w kanale grzewczym. Maksymalne wartości prędkości występują przede wszystkim w kanałach dolotowych gazu i powietrza w ciągu wznoszącym. Po wymieszaniu obu strumieni, bardziej intensywny przepływ można zaobserwować po stronie wlotów powietrza aż do połowy wysokości kanału (2,5-3,0 m). W górnej części ciągu wnoszącego pole prędkości jest praktycznie wyrównane w całym przekroju. W tej części kanału prędkość osiąga wartość na poziomie 1,5 m/s i po przepłynięciu spalin przez przewał utrzymuje się na tym poziomie prawie w całym ciągu opadającym. Oczywiście lokalne podwyższenie prędkości następuje w kanałach wylotowych z kanału grzewczego.



Rys. 5. Rozkład modułu wektora prędkości (m/s) bezpośrednio po rewersji po 3,5 h od rozpoczęcia cyklu koksowania w trzech przekrojach przez (a) palnik, (b) kanały dolotowe powietrza oraz (c) kanały wylotowe spalin.



Rys. 6. Rozkład wektora prędkości (m/s) bezpośrednio po rewersji po 3,5 h od rozpoczęcia cyklu koksowania w trzech przekrojach przez (a) palnik, (b) kanały dolotowe powietrza oraz (c) kanały wylotowe spalin.

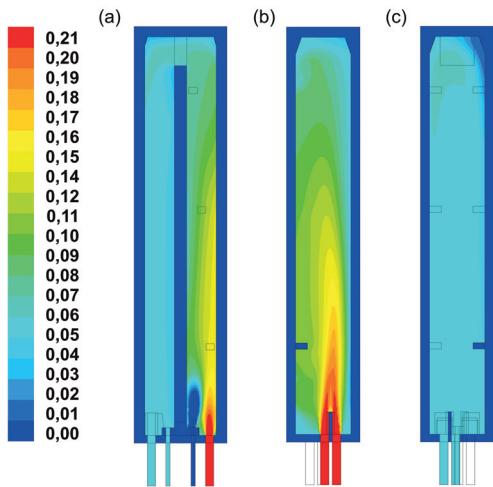
Rozkład udziału molowego tlenu na rysunku 7 wskazuje, że jego najwyższa wartość występuje w kanale dolotowym powietrza i jest równa udziałowi pierwiastka tlenu w powietrzu atmosferycznym. Udział tlenu w miarę przepływu, a tym samym dopalania gazu, spada do kilku procent tuż przed przewalem kanału. W ciągu opadającym udział tlenu jest praktycznie stały od przewалу aż do wylotu spalin.

Z kolei na rysunku 8 przedstawione są wyniki symulacji zmian temperatury wraz z wysokością kanału wzdłuż trzech różnych pionowych linii (B, D i G). Należy zwrócić uwagę na to, że uzyskane krzywe przedstawiają generalnie temperaturę spalin, chociaż w punktach D oraz G dolne części krzywych przedstawiają również temperaturę wyłożenia kanału (poniżej poziomu palników).

Literatura

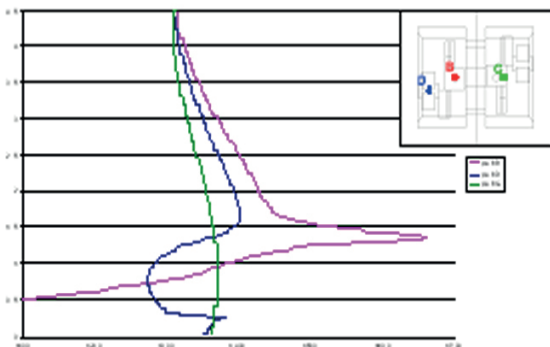
- [1] Anderson J.D., Jr.: Computational Fluid Dynamics. The Basics with Applications, McGraw-Hill, USA, 1995.
- [2] Tannehill J.C., Anderson D.A., Pletcher R.H.: Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer, Taylor&Francis, 1997.
- [3] User's guide of ANSYS Fluent 12. Release 12.0, ©ANSYS, Inc., 2009.

Praca została wykonana w ramach projektu kluczowego nr POIG.01.01.02-24-017/08 „Inteligentna koksownia spełniająca wymogi najlepszej dostępnej techniki” dofinansowanego z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego realizowanego w Instytucie Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrzdu.



Rys. 7. Rozkład udziału molowego tlenu bezpośrednio po rewersji po 3,5 h od rozpoczęcia cyklu koksowania w trzech przekrojach przez (a) palnik, (b) kanały dolotowe powietrza oraz (c) kanały wylotowe spalin.

Znaczne zmiany temperatury w punktach B i D wynikają z procesu spalania gazu w kanale wznosnym. Maksymalne wartości na tych dwóch krzywych pozwalają także wnioskować o wysokości płomienia.



Rys. 8. Profil temperatury (w °C) wzdłuż wysokości kanału w wybranych punktach B, D i G

### Podsumowanie

W ramach projektu „Inteligentna Koksownia” wykonano numeryczny model pracy kanałów grzewczych baterii koksowniczej typu PWR-63. Model został zwalidowany w oparciu o pomiary przeprowadzone na rzeczywistym obiekcie. Należy podkreślić, że możliwe jest przeprowadzenie obliczeń symulacyjnych zarówno dla stanów cieplnie ustalonych jak i nieustalonych pracy kanału. Zaprezentowany model numeryczny może również z powodzeniem zostać wykorzystany jako narzędzie wspomagające prace projektowe nad nowymi typami kanałów grzewczych.

**URZĄDZENIA:**

- do wygrzewania kadzi, suszenia i spiekania wymurówki wyposażone w:
  - klasyczne palniki gazowe,
  - palniki i autoreperacyjne,
  - palniki inżektorowe.
- stacjonarne i przewoźne.
- do wygrzewania tygli, kanałów i wylewów.
- oszczędność energii
- zwiększenie trwałości wymurówki
- niezawodność
- kilkadziesiąt zrealizowanych instalacji
- 10 lat doświadczeń

61-139 Poznań, ul. Jana Pawła II nr 14  
tel.: (61) 872 00 56 i 65 70 555  
telefaks: (61) 87 50 164  
e-mail: biuro@apag.com.pl

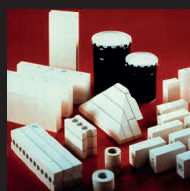
[www.apag.com.pl](http://www.apag.com.pl)



Standardowe grupy produktów oferowanych przez Thermal Ceramics Polska:

- Wysokotemperaturowe włókna szklane typu SUPERWOOL o temperaturze klasyfikacyjnej do 1300 °C
- Włókna Ceramiczne o temperaturze klasyfikacyjnej do 1600 °C
- Lekkie prostki i kształtki ogniotrwałe do 1790 °C
- Betony izolacyjne i ogniotrwałe do 1800 °C

Thermal Ceramics Polska działająca na rynku polskim od 1999 roku oferuje swoim klientom pełną gamę lekkich, energooszczędnych, wysokiej jakości materiałów ogniotrwałych. Morgan Thermal Ceramics posiada oddziały sprzedaży w ponad 40 krajach na świecie produkując swoje wyroby w bez mała 30 z nich.



Thermal Ceramics Polska Sp. z o. o.  
ul. Towarowa 9, 44 – 100 Gliwice  
tel.: 32 3053113, 3053114; faks 32 3053115;  
tel.kom.: 604 507351, 602 251351  
polska.tc@morganplc.com

