



**Monika Zajemska¹, Henryk Radomiak¹, Dorota Musiał¹, Anna Poskart¹,
Александр Олегович Ерёмин², Monika Jarnecka³, Anna Chamara³,
Kamila Śpiewak³, Przemysław Rajca³, Magdalena Kocyba³,
Maciej Janicki³, Kinga Boron³**

¹ *Katedra Pieców Przemysłowych i Ochrony Środowiska*

Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów

Politechnika Częstochowska, al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa

e-mail: zajemska@wip.pcz.pl

² *Кафедра Экологии, теплотехники и охраны труда*

Факультет Механико-машиностроительный

Национальная Металлургическая Академия Украины

³ *Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów*

Politechnika Częstochowska, al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa

WYKORZYSTANIE TECHNIKI OBLICZENIOWEJ DO MODELOWANIA BEZPIECZNEJ PRACY PRZEMYSŁOWEJ KOMORY GRZEWOCZEJ

Streszczenie. Szczególnym rodzajem zagrożeń możliwych do wystąpienia na terenie wielu zakładów przemysłowych (np. na terenie huty) są zagrożenia związane z obecnością niebezpiecznych substancji, w tym gazów palnych, takich jak gaz ziemny czy gaz koksowniczy. Niewłaściwe spalanie tych gazów w komorach grzewczych może być bezpośrednią przyczyną niekontrolowanego uwalniania się szkodliwych dla zdrowia i życia substancji, takich jak tlenek węgla czy niedopalone węglowodory. Sytuacja jest szczególnie niebezpieczna w przypadku nadciśnienia w komorze grzewczej, ponieważ wiąże się to z „wybijaniem spalin”, tzn. uwalnianiem się produktów spalania paliwa na zewnątrz, co może być przyczyną zatrucia organizmu. Ze względu na powyższe, w niniejszym artykule przedstawiono możliwości wykorzystania techniki obliczeniowej do prognozowania zagrożeń związanych ze spalaniem paliwa gazowego w komorze grzewczej, a mianowicie w piecu przepychowym do nagrzewania wsadu metalowego. Zaproponowana metoda przewidywania składu chemicznego spalin umożliwia odpowiednią kontrolę procesu spalania, zmierzającą do zmniejszenia negatywnych skutków zarówno środowiskowych, jak i zdrowotnych.

Słowa kluczowe: zagrożenie, tlenek węgla, pożar, modelowanie, chemkin, komora grzewcza.

APPLICATION OF COMPUTATIONAL TECHNIQUES TO MODEL THE SAFE OPERATION OF INDUSTRIAL HEATING CHAMBER

Abstract. A special type of threats possible to occur in many industrial plants (eg. at the smelter) are risks associated with the presence of hazardous substances, including flammable gases, such as natural gas and coke oven gas. Improper combustion of these gases in the heating chambers may be a direct cause of the uncontrolled release of harmful substances for health and life, such as carbon monoxide and unburned hydrocarbons. The situation is particularly dangerous in the case of overpressure in the heating chamber, because it involves the "knocking out of flue gas", i.e. release of combustion products on the outside, which can cause poisoning of the human body. Due to the above, in this paper the possibility of using computer technology to predict the risks associated with the combustion gas in the heating chamber, namely in the pusher furnace to heat the metal charge was presented. The proposed method of predicting the chemical composition of flue gas allows to proper control of the combustion process, in order to reduce the negative effects of both environmental and health problems.

Keywords: hazard, carbon monoxide, fire, modeling, chemkin, heating chamber.

Wprowadzenie

Pracy w przemyśle nieodzownie towarzyszą różnego rodzaju zagrożenia. Do jednych z najgroźniejszych należą te związane z wybuchem i pożarem. Dlatego też zapewnienie bezpieczeństwa pracy w warunkach narażonych na występowanie ww. zagrożeń jest niezmiernie istotną kwestią. Obowiązek zapewnienia bezpieczeństwa nie spoczywa tylko na służbach odpowiedzialnych za kwestię bhp, ale również na pracownikach. Świadomość wystąpienia ewentualnego zagrożenia może zminimalizować ryzyko wybuchu, a nawet zapobiec poważnym awariom. Pracownik powinien zatem posiadać podstawową wiedzę na temat zagrożeń występujących podczas wykonywania swojej pracy, a także zagrożeń występujących na terenie całego zakładu [17]. Chodzi tutaj szczególnie o zakłady o zwiększonym (ZZR) i dużym ryzyku wystąpienia poważnej awarii przemysłowej (ZDR) [15].

Informacje o zagrożeniach i zabezpieczeniach przed wybuchem są zebrane w tzw. *Dokumencie Zabezpieczenia Przed Wybuchem (DZPW)*. Jest to najważniejszy dokument w dziedzinie bezpieczeństwa wybuchowego, jaki, zgodnie z obowiązującym prawem, powinien posiadać pracodawca [16, 19]. Dokument ten obejmuje klasyfikację stref zagrożenia wybuchem oraz ocenę ryzyka związanego z możliwością eksplozji atmosfery wybuchowej, na skutek obecności na terenie zakładu substancji palnych będących surowcami, produktami,

półproduktami lub materiałami pomocniczymi. Należy w tym miejscu nadmienić, że rozporządzenie nakłada również na pracodawcę obowiązek wykonywania aktualizacji DZPW, *wtedy, gdy miejsce pracy, urządzenia lub organizacja pracy uległy zmianom, które mogą mieć wpływ na wynik oceny ryzyka* [18, 19].

Atmosfery wybuchowe i strefy zagrożenia wybuchem

Potocznie, wybuchem określa się gwałtowne wydzielenie się dużych ilości energii w jednym miejscu, z jednoczesnym intensywnym wzrostem temperatury i ciśnienia. Wizualnym efektem wybuchu jest tzw. fala uderzeniowa [17]. Szczególnym rodzajem wybuchów są wybuchy przestrzenne, zainicjowane przechowywaniem lub stosowaniem, np. w procesach technologicznych, substancji niebezpiecznych, takich jak: gazy, pary, pyły czy ciecze. Niezmiernie istotne, z punktu widzenia bezpieczeństwa życia ludzkiego, jest wyznaczenie przestrzeni zagrożonych wybuchem, tj. stref zagrożenia [5].

Pod pojęciem strefy zagrożenia wybuchem, tj. *miejsca, do którego sięga zagrożenie*, należy rozumieć obszar, w którym może występować mieszanina substancji palnej z powietrzem czy też innym utleniaczem o stężeniu mieszczącym się między dolną i górną granicą wybuchowości [20, 21]. Ze względu na problemy związane z określeniem zasięgu stref zagrożonych wybuchem wprowadzone są stosowne wytyczne, m.in. Polska Norma PN-EN 60079-101:2009 oraz norma europejska EN 61241-10:2004 [12, 13].

Dodatkowo, w oparciu o temperatury samozapłonu, wprowadzono klasyfikację atmosfer wybuchowych gazów i par cieczy (tabela 2) [17].

Jeszcze większe problemy przysparza ilościowe oszacowanie prawdopodobieństwa wystąpienia atmosfery wybuchowej, przede wszystkim ze względu na zmienne warunki środowiskowe i brak możliwości przewidzenia dokładnego czasu powstania takiej atmosfery [19]. Dlatego też umownie przyjmuje się czas występowania mieszaniny wybuchowej w zależności od kategorii strefy zagrożenia wybuchem, w oparciu o definicję danej strefy, a mianowicie [19]:

- dla strefy 2 i 22 – 10 godzin rocznie,
- dla strefy 1 i 21 – 100 godzin rocznie,
- dla strefy 0 i 20 – 1000 godzin rocznie lub przez cały czas pracy instalacji.

Tab. 1. Strefy zagrożenia wybuchem [20, 21]

Palne gazy, mgły i pary palnych cieczy		
Strefa 0	Przestrzeń, w której atmosfera wybuchowa zawierająca mieszaninę z powietrzem substancji palnych w postaci gazów, par, mgieł, występuje stale, często lub przez długie okresy.	Atmosfera wybuchowa obecna jest cały czas
Strefa 1	Przestrzeń, w której atmosfera wybuchowa zawierająca mieszaninę z powietrzem substancji palnych w postaci gazów, par, mgieł, może czasami wystąpić w trakcie normalnego działania.	Atmosfera wybuchowa obecna jest często
Strefa 2	Przestrzeń, w której atmosfera wybuchowa zawierająca mieszaninę z powietrzem substancji palnych w postaci gazów, par, mgieł, nie występuje w trakcie normalnego działania, a w przypadku wystąpienia, utrzymuje się przez krótki okres.	Atmosfera wybuchowa może być obecna przypadkowo
Palne pyły		
Strefa 20	Przestrzeń, w której atmosfera wybuchowa w postaci obłoku palnego pyłu w powietrzu występuje stale, często lub przez długie okresy.	Atmosfera wybuchowa obecna jest cały czas
Strefa 21	Przestrzeń, w której atmosfera wybuchowa w postaci obłoku palnego pyłu w powietrzu może czasami wystąpić w trakcie normalnego działania.	Atmosfera wybuchowa obecna jest często
Strefa 22	Przestrzeń, w której atmosfera wybuchowa w postaci obłoku palnego pyłu w powietrzu nie występuje w trakcie normalnego działania, a w przypadku wystąpienia, utrzymuje się przez krótki okres.	Atmosfera wybuchowa może być obecna przypadkowo

Tab. 2. Klasyfikacja atmosfer wybuchowych gazów i par cieczy [17]

Klasa temperaturowa	Temperatura samozapłonu, °C
T1	Powyżej 450
T2	Powyżej 300–450
T3	Powyżej 200–300
T4	Powyżej 135–200
T5	Powyżej 100 do 135
T6	Powyżej 85–100

Przewidywanie wybranych zagrożeń w zakładzie ZDR

Jak wspomniano wcześniej, miejscem, w którym może dojść do poważnych zagrożeń, a w szczególności wybuchu czy też pożaru, jest zakład o dużym ryzyku wystąpienia poważnej awarii przemysłowej (ZDR), np. zakład o pełnym cyklu produkcyjnym (tj. huta zintegrowana) [14, 22].

Na terenie huty mogą wystąpić różnego rodzaju zagrożenia, związane m.in. z [1, 2, 7, 14]:

- emisją palnych gazów, takich jak: gaz wielkopiecowy i gaz koksowniczy,
- niekontrolowanym wyciekami gazów technicznych, oleju płuczkowego ze zbiorników oraz instalacji, benzolu koksowniczego i smoły koksowniczej, roztworu arsenikowo-sodowego z instalacji odsiarczania gazu koksowniczego,
- wystąpieniem toksycznych oparów benzolu koksowniczego, powstałych podczas pożaru zbiorników z tą substancją.

Szczególnie istotnym rodzajem zagrożeń jest emisja zarówno palnych gazów, jak i produktów ich niezupełnego spalania (np. CO), tworzących z powietrzem niebezpieczną mieszaninę, która może być przyczyną pożaru lub wybuchu [9]. W zależności od wzajemnych proporcji powietrza i paliwa dochodzi do reakcji tj. spalania, któremu towarzyszy bardzo duża prędkość rozwoju płomienia. Dla przykładu, prędkość wybuchu gazu ziemnego wynosi 2320 m/s, a wodoru aż 2820 m/s. Czynnikiem, który inicjuje zapłon lub zapalenie może być iskra lub przekroczenie temperatury samozapłonu [2, 5].

W związku z powyższym zakłady narażone na emisję palnych gazów (np. huta ARCELORMITTAL POLAND S.A.) wprowadzają dodatkowe środki bezpieczeństwa w postaci procedur kontrolnych lub systemów detekcji gazów toksycznych i wybuchowych [2, 6].

Jednak ww. środki nie są wystarczające. Dla osób znajdujących się w bezpośredniej bliskości urządzeń, w których spalane są palne gazy, tylko wczesne wykrycie uwalnianych się szkodliwych substancji może uchronić te osoby przed utratą zdrowia, a nawet życia. Dlatego też nieocenionym narzędziem do przewidywania tego typu zagrożeń jest zaproponowane przez Autorów oprogramowanie CHEMKIN-PRO, produktu amerykańskiej firmy Reaction Design [23]. Zastosowane do obliczeń oprogramowanie wykorzystywane jest na szeroką skalę w motoryzacji przez największe koncerny, takie jak: Toyota, Honda, Mazda, Ford Motor Company, Nissan i wiele innych oraz przez światowe ośrodki naukowo-badawcze takie, jak: Uniwersytety w Michigan, Tokio, Minnesocie, Karlsruhe i Colorado, a także przez Narodową Agencję Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej.

Autorzy artykułu już od kilkunastu lat zajmują się prognozowaniem emisji zanieczyszczeń, zarówno w skali laboratoryjnej, jak i przemysłowej. Na uwagę

zasługują prace badawcze wykonane na zlecenie podmiotów gospodarczych, tj. hut zlokalizowanych na terenie kraju, zakładów energetycznych, ciepłowni, kotłowni, budownictwa mieszkaniowego i wielu innych. Przy użyciu ww. oprogramowania modelowano w szczególności proces spalania w aspekcie bezpieczeństwa ekologicznego [2, 4, 6, 8–11].

Należy w tym miejscu podkreślić, że złożoność procesu spalania, szczególnie dla przemysłowych urządzeń grzewczych, wymaga zastosowania w obliczeniach komputerowych szeregu uproszczeń, a w szczególności: ograniczenia stref pieca, ograniczenia ilości reakcji i związków chemicznych opisujących proces spalania, jak również doboru prostego, 0-wymiarowego reaktora, np. idealnego wymieszania (PSR). Dla sformułowania warunków brzegowych i początkowych niezbędna jest również znajomość szeregu danych i parametrów pracy urządzenia grzewczego, takich jak [8]:

- geometria komory spalania,
- strumienie wprowadzanych mediów (tj. paliwa i utleniacza),
- skład chemiczny reagentów,
- prędkość spalin,
- temperatura w komorze spalania,
- temperatura podgrzanego powietrza.

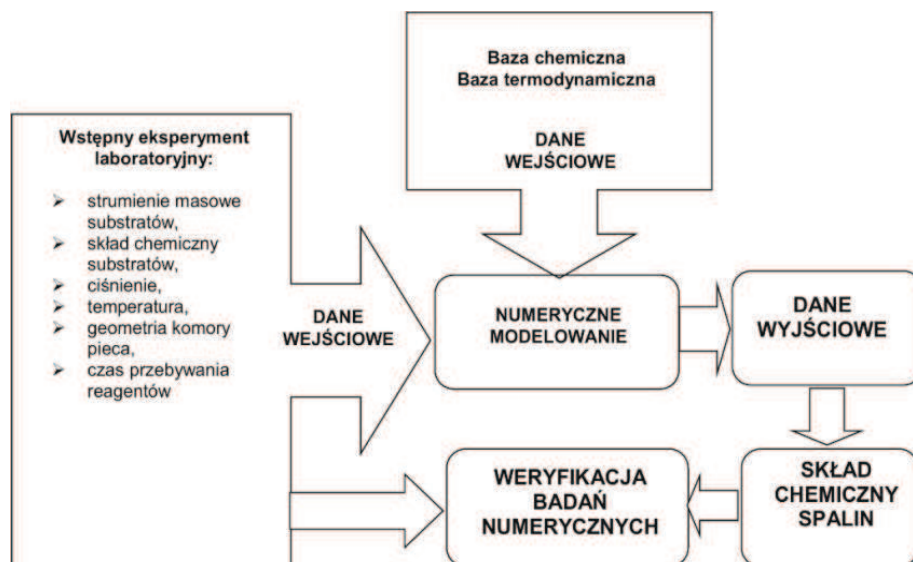
Natomiast do opisu chemii procesu spalania niezbędna jest znajomość mechanizmów formowania zanieczyszczeń oraz danych:

- termodynamicznych,
- transportowych,
- chemiczno-kinetycznych.

Procedura obliczeniowa

Obliczenia komputerowe przeprowadzono przy użyciu najnowszej wersji licencjonowanego oprogramowania CHEMKIN-PRO, amerykańskiej firmy Reaction Design. Do obliczeń użyto reaktora PSR (Perfectly Stirred Reactor) opartego na warunku idealnego wymieszania, zarówno substratów, jak i produktów oraz reaktora z przepływem tłokowym PFR (Plug Flow Reactor). Zaimplementowanym do obliczeń mechanizmem chemicznym był mechanizm utleniania metanu GRI-Mech, wersja 3.0 (opracowana przez naukowców z Gas Research Institute) [24]. Plik chemiczny obejmował 320 reakcji i 52 związki chemiczne, a mianowicie: H_2 , H , O , O_2 , OH , H_2O , HO_2 , H_2O_2 , C , CH , CH_2 , $CH_2(S)$, CH_3 , CH_4 , CO , CO_2 , HCO , CH_2O , CH_2OH , CH_3O , CH_3OH , C_2H , C_2H_2 , C_2H_3 , C_2H_4 , C_2H_5 , C_2H_6 , $HCCO$, CH_2CO , $HCCOH$, N , NH , NH_2 , NH_3 , NNH , NO , NO_2 , N_2O , HNO , CN , HCN , H_2CN , $HCNN$, $HCNO$, $HOCN$, $HNCO$, NCO , N_2 , C_3H_7 , C_3H_8 , CH_2CHO , CH_3CHO .

Na rys. 1 przedstawiono uproszczony schemat procedury obliczeniowej.



Rys. 1. Uproszczony schemat procedury obliczeniowej

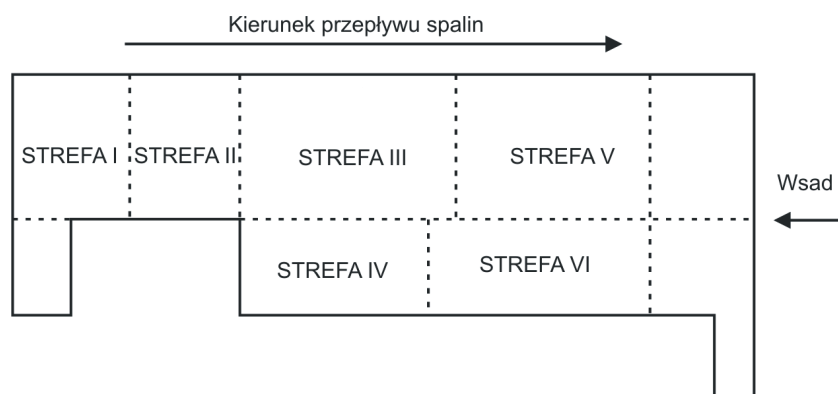
Obliczenia przeprowadzono dla przemysłowej komory grzewczej, którą stanowił piec grzewczy do nagrzewania wsadu przed przeróbką plastyczną, zlokalizowany na terenie jednej z krajowych hut. Piec podzielony jest na trzy strefy grzewcze, a mianowicie:

- podgrzewczą (1073÷1373 K),
- grzewczą (1373÷1623 K),
- wyrównawczą (1423÷1553 K)

i opalany jest zarówno gazem ziemnym GZ-50, jak i gazem koksowniczym.

Wyżej wymienione paliwa, w zależności od ilości gazu koksowniczego, którym dysponuje huta, mogą być spalane oddzielnie lub współspalane. W przypadku niedoboru gazu koksowniczego piec pracuje tylko na gazie ziemnym. Na potrzeby niniejszego artykułu obliczenia przeprowadzono dla samego gazu ziemnego.

Pod względem automatyki piec podzielony jest na sześć stref regulacyjnych (rys. 2) i wyposażony jest w 105 palników zainstalowanych na stropie i ścianach bocznych. Wszystkie dane techniczne pieca zostały zaczerpnięte z niepublikowanego raportu [3], wykonanego na potrzeby projektu rozwojowego pod kierownictwem jednego z głównych Autorów artykułu.



Rys. 2. Uproszczony schemat pieca z podziałem na strefy [3]

Do sformułowania warunków początkowych konieczne było wprowadzenie następujących danych:

- wymiary stref regulacyjnych pieca (tab. 3),
- strumienie objętości gazu i powietrza dostarczane do poszczególnych stref pieca (tab. 4),
- średni skład gazu ziemnego dostarczanego do huty:
 $\text{CH}_4 = 94 \%$, $\text{C}_2\text{H}_6 = 1,5 \%$, $\text{CO}_2 = 0,2 \%$, $\text{O}_2 = 0,1 \%$, $\text{N}_2 = 4,2 \%$,
- temperatura w poszczególnych strefach (tab. 4),
- średnia temperatura powietrza doprowadzanego do spalania: 623 K,
- średnie nadciśnienie w komorze pieca - 7,4077 Pa.

Tab. 3. Wymiary stref regulacyjnych przyjętych do obliczeń [3]

Strefy	Długość (m)	Szerokość (m)	Wysokość (m)
I	4,80	7,8	1,25
II	4,10	7,8	1,25
III	8,10	7,8	1,25
IV	6,60	7,8	1,25
V	12,60	7,8	2,05
VI	14,10	7,8	2,05
ogółem	29,60	7,8	

Tab. 4. Zestawienie pozostałych danych niezbędnych do obliczeń [3]

Strefa	I	II	III	IV	V	VI
Strumień gazu (Nm ³ /s)	0,0658	0,0362	0,1949	0,1720	0,1316	0,0169
Strumień powietrza (Nm ³ /s)	0,5974	0,4314	1,8897	1,6686	1,3337	0,6901
Temperatura (K)	1524	1542	1554	1550	1348	1337
Nadmiar powietrza (λ)	0,95	1,25	1,02	1,02	1,07	4,29

Wyniki obliczeń

W ramach obliczeń wyznaczono skład chemiczny spalin w każdej ze stref osobno. Ze względu na panujący w strefie I niedobór powietrza, będący wymogiem technologicznym, i związane z nim zagrożenie z tytułu formowania w tej strefie tlenku węgla, wodoru oraz niedopalonych węglowodorów, szczegółowy plik wynikowy, obejmujący wszystkie produkty spalania przedstawiono tylko dla tej strefy (rys. 3). Dla pozostałych stref, bez uwzględniania kierunku przepływu spalin, przedstawiono jedynie wybrane produkty spalania (tab. 5). Obliczono, że czas przebywania reagentów w strefie I wynosi 74 sekundy.

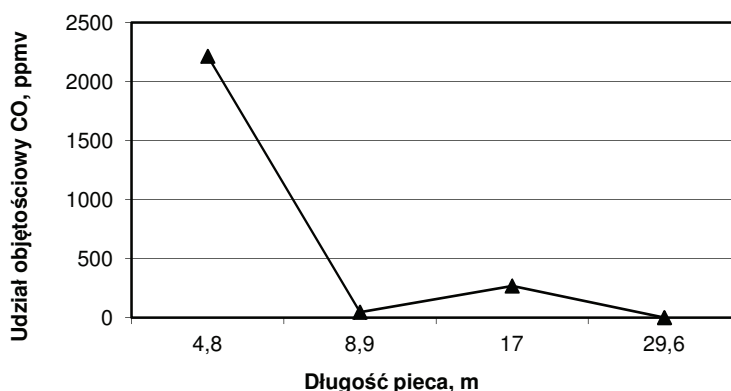
Tab. 5. Zestawienie wybranych produktów spalania w każdej ze stref pieca oddzielnie

Udział molowy produktów spalania	Strefa I	Strefa II	Strefa III	Strefa IV	Strefa V	Strefa VI
O ₂	0,00021	0,04512	0,01088	0,01101	0,01879	0,15920
CO ₂	0,09389	0,07503	0,09035	0,09029	0,08704	0,02316
CO	0,00221	0,00002	0,00029	0,00029	0,00002	0,00000

Z przedstawionych na rys. 3 oraz w tab. 5 danych widać, że z ekologicznego punktu widzenia największe zagrożenie ma miejsce w strefie pierwszej, ze względu na panujący tam niedomiar powietrza ($\lambda = 0,95$) i generowanie znacznych ilości tlenku węgla, których poziom na wyjściu z tej strefy osiąga wartość 0,22%. Niedobór tlenu prowadzi ponadto do powstawania znacznych ilości H₂ (0,11%) na skutek niepełnego spalania metanu (rys. 3). Zarówno tlenek węgla, jak i wodór wymagają dopalenia, co ma miejsce w kolejnych strefach pieca, ze względu na panujący tam nadmiar tlenu (rys. 4).

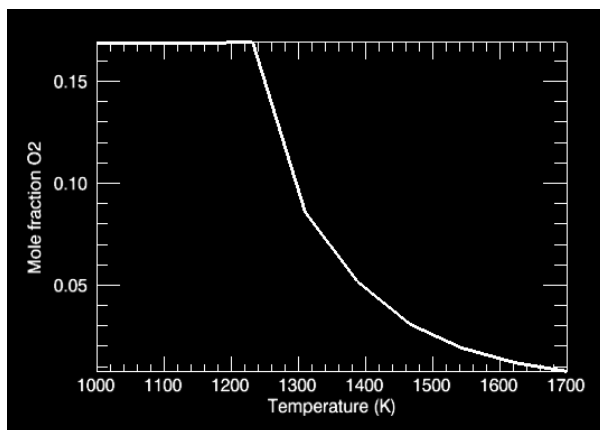
H2	=	1.1092E-03	
H	=	1.7950E-05	
O	=	2.7779E-06	
O2	=	2.0784E-04	
OH	=	2.2531E-04	
H2O	=	0.1887	
HO2	=	1.1335E-08	
H2O2	=	2.9739E-09	
C	=	2.7279E-21	
CH	=	8.7634E-22	
CH2	=	1.2744E-20	
CH2(S)	=	5.1617E-22	
CH3	=	6.5750E-19	
CH4	=	2.0257E-18	
CO	=	2.2147E-03	
CO2	=	9.3886E-02	
HCO	=	2.0750E-11	
CH2O	=	1.0271E-12	
CH2OH	=	6.2833E-19	
CH3O	=	7.2137E-21	
CH3OH	=	2.4019E-19	
C2H	=	-1.8756E-26	
C2H2	=	-2.7725E-22	
C2H3	=	-1.0761E-27	
C2H4	=	-1.1904E-26	
C2H5	=	-4.0430E-31	
C2H6	=	1.5077E-29	
HCCO	=	1.2126E-22	
CH2CO	=	8.6247E-22	
HCCOH	=	6.2315E-24	
N	=	5.4155E-11	
NH	=	1.7335E-11	
NH2	=	2.4659E-11	
NH3	=	5.5605E-10	
NNH	=	2.7683E-11	
NO	=	9.5241E-05	
NO2	=	6.8230E-09	
N2O	=	7.9626E-09	
HNO	=	8.0427E-10	
CN	=	1.2556E-16	
HCN	=	5.6748E-13	
H2CN	=	2.5919E-20	
HCNN	=	1.4113E-24	
HCNO	=	3.8331E-19	
HOCN	=	3.4959E-14	
HNCO	=	3.6427E-11	
NCO	=	1.6424E-13	
N2	=	0.7136	
C3H7	=	-1.2237E-38	
C3H8	=	7.7306E-37	
CH2CHO	=	9.2145E-28	
CH3CHO	=	4.8928E-29	
Volatile organic compounds	(ppm):	5.8807E-05	
Unburned hydrocarbons	(ppm):	2.6968E-12	

Rys. 3. Obliczony skład chemiczny spalin na wyjściu ze strefy I wyrażony w udziałach molowych

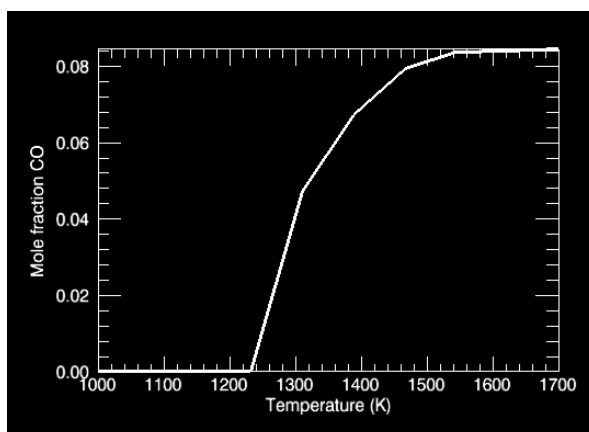


Rys. 4. Udział objętościowy CO na długości pieca

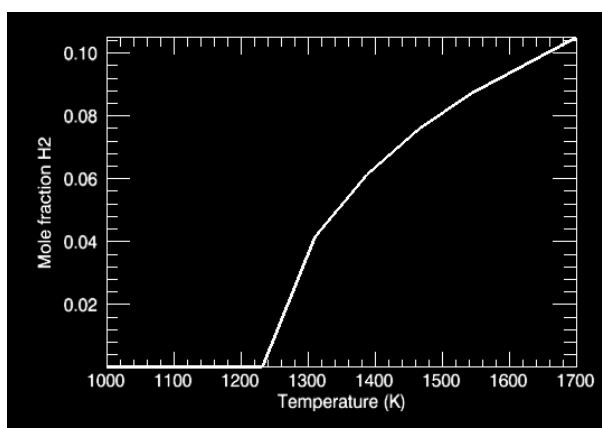
Skład spalin w poszczególnych strefach pieca zależy nie tylko od stosunku nadmiaru powietrza, jak wykazano powyżej, ale również od panującej w tych strefach temperatury. Na rys. 5–8 przedstawiono wpływ temperatury na stężenie wybranych produktów spalania w strefie I pieca grzewczego zaraz po rozpoczęciu procesu spalania, tj. po czasie 0,1 s, a mianowicie: O_2 , CO, H_2 oraz niedopalonych węglowodorów. W rozważaniach wzięto pod uwagę zakres temperatur 1000–1700 K, podczas gdy rzeczywista temperatura w strefie I wynosiła 1524 K (tab. 4). Z rys. 5 widać wyraźnie, że stężenie tlenu gwałtownie maleje po przekroczeniu temperatury ok. 1240 K, co przekłada się na równie gwałtowny wzrost w tym samym zakresie temperatur CO (rys. 6) i H_2 (rys. 7). Im wyższa temperatura w strefie, tym wyższe stężenie analizowanych produktów spalania. Podobnie przedstawia się sytuacja dla niedopalonych węglowodorów (rys. 8). W temperaturze 1000 K ich stężenie jest jeszcze niewielkie i wynosi ok. 19 ppm, podczas gdy w temperaturze ok. 1450 już 800 ppm. Uzyskane wyniki obliczeń w funkcji temperatury pokazują, jakie wartości stężeń mogą osiągać niepożądane z ekologicznego punktu widzenia produkty spalania, i jak ważny jest reżim temperaturowy, nie tylko w aspekcie technologicznym. Nawet niewielki wzrost temperatury może skutkować zwiększoną koncentracją tlenu węgla, wodoru czy niedopalonych węglowodorów.



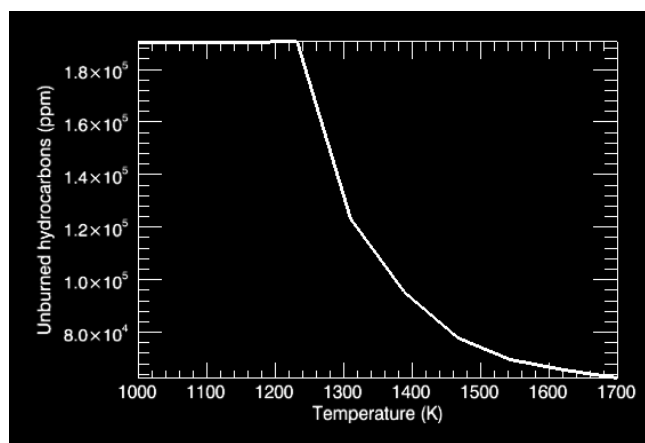
Rys. 5. Wpływ temperatury na udział molowy tlenu w strefie I



Rys. 6. Wpływ temperatury na udział molowy tlenku węgla w strefie I

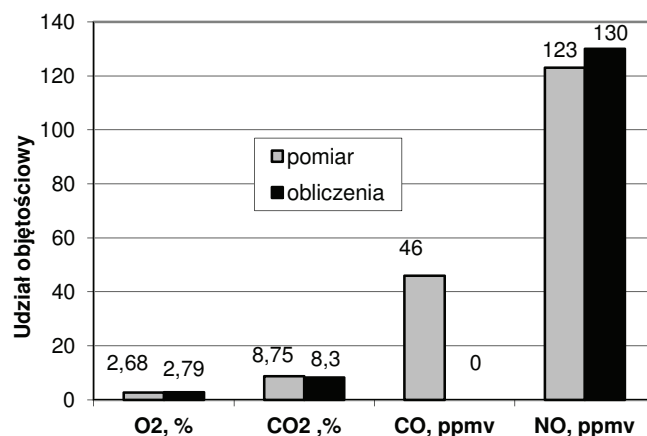


Rys. 7. Wpływ temperatury na udział molowy wodoru w strefie I



Rys. 8. Wpływ temperatury na udział molowy niedopalonych węglowodorów w strefie I

W celu potwierdzenia poprawności wyników uzyskanych w ramach obliczeń dokonano analizy porównawczej z wynikami uzyskanymi w ramach pomiarów na obiekcie rzeczywistym. Skład chemiczny spalin, ze względu na ograniczenia techniczne, mierzony był na wyjściu z pieca grzewczego (rys. 9). Obliczenia wykonano, zakładając, że spaliny przemieszczają się w przeciwnym kierunku do kierunku ruchu wsadu, co oznacza, że skład spalin na wyjściu z pieca był sumą spalin ze strefy I, II, III, IV, V, VI.



Rys. 9. Porównanie zmierzonych i obliczonych stężeń wybranych produktów spalania na wyjściu z pieca

Z przeprowadzonej analizy porównawczej wynika, że wartości stężeń zmierzonych i obliczonych wybranych produktów spalania są bardzo zbliżone.

Zaistniałe różnice wynikają z warunków prowadzonych pomiarów, tj. wnikania „fałszywego” powietrza podczas otwarcia okien manewrowych i wsadowych. Powyższy fakt przemawia na korzyść wyników otrzymanych na drodze obliczeń numerycznych. Wartości obliczonych udziałów produktów spalania są wiarygodne i świadczą o poprawności przyjętych do obliczeń założeń i mechanizmów chemicznych.

Podsumowanie

Zakłady hutnicze, ze względu na zagrożenia związane z emisją palnych związków podczas energetycznego użytkowania gazów, należą do grupy zakładów wysokiego ryzyka związanego z pożarem czy wybuchem. Zagrożenie to może istotnie wzrosnąć, jeśli do opalania komór grzewczych zamiast gazu ziemnego zastosuje się gaz koksowniczy. Konsekwencją jego użytkowania, ze względu na właściwości, a w szczególności toksyczność i łatwopalność, może być nie tylko wspomniany pożar czy wybuch, ale przede wszystkim zatrucie tlenkiem węgla. Dlatego też zaproponowane w niniejszym artykule przewidywanie emisji szkodliwych związków, takich jak: tlenek węgla, wodór czy niepodopalone węglowodory może zminimalizować ryzyko wystąpienia poważnego zagrożenia zarówno dla życia i zdrowia człowieka, jak i całego zakładu.

Zaprezentowane w niniejszym artykule wyniki symulacji komputerowych pokazały tylko nieliczne możliwości wykorzystania oprogramowania CHEMKIN-PRO w zakresie przewidywania zagrożeń związanych z powstawaniem i uwalnianiem się niepożądanych związków w procesie spalania w przemysłowych komorach grzewczych. Należy podkreślić, że obliczenia wykonano dla stałych wartości strumieni powietrza i gazu dla poszczególnych stref pieca. W warunkach rzeczywistych widoczne są wyraźne wahania, zarówno dobowe, jak i godzinowe, w dostarczanych do poszczególnych stref pieca strumieniach. Wahania te związane są ze zmianą temperatury, a tym samym składu chemicznego spalin w przestrzeni roboczej pieca, co przekłada się na emisję zanieczyszczeń i związane z nią zagrożenia.

Na uwagę zasługuje fakt, że tak szczegółowa analiza procesu spalania nie byłaby możliwa do zrealizowania, nawet przy użyciu najnowocześniejszej aparatury kontrolno-pomiarowej, zarówno w warunkach przemysłowych, jak i na stanowisku doświadczalnym.

Za pomocą zaproponowanego narzędzia obliczeniowego można bowiem precyzyjnie oszacować skład atmosfery nawet w pobliżu frontu płomienia, gdzie dochodzi do formowania rodników metylu CH_3 , metenu CH_2 i metynu CH , inicjujących tworzenie niepożądanych produktów, takich jak: etan, acetylen i inne węglowodory. Podczas spalania z niedomiarem tlenu, obok ww.

związków poważnym zagrożeniem dla zdrowia człowieka, ze względu na rakotwórcze właściwości, są wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), które można, przy użyciu oprogramowania CHEMKIN-PRO przewidywać, uwzględniając odpowiedni mechanizm chemiczny.

Literatura

- [1] Domański W., *Transport i magazynowanie gazów technicznych*, [w:] Prace Naukowe Akademii Jana Długosza w Częstochowie, Technika, Informatyka, Inżynieria Bezpieczeństwa, t. I, 2013, s. 57–67.
- [2] Nocuń S., Antos J., Zajemska M., Radomiak H., Poskart A., *Wykrywanie zagrożeń związanych z uwalnianiem palnych gazów w zakładach przemysłowych o pełnym cyklu produkcyjnym*, [w:] Monografie nr 48, 2015, s. 407–411.
- [3] Radomiak H., Szecówka L., Zajemska M. i in., *Opracowanie komputerowego systemu projektowania niskoemisyjnych i energooszczędnych technologii nagrzewania stali w piecach grzewczych. Niepublikowany raport z realizacji projektu rozwojowego*, Częstochowa 2010.
- [4] Radomiak H., Zajemska M., Musiał D., Morel S., *Numeryczne prognozowanie produktów spalania jako podstawa do oceny zagrożenia środowiska*, [w:] Polityka Energetyczna, z.1, T.19, 2016, s. 149–156.
- [5] Sawicki T., *Wybuchy przestrzenne*, [w:] Bezpieczeństwo pracy, nr 11, 2005, s. 22–25.
- [6] Zajemska M., Musiał D., Radomiak H., *Zagrożenia i sposoby zabezpieczeń przed działaniem palnych gazów w budownictwie mieszkaniowym*, [w:] Logistyka, nr 5, 2015, s. 1671–1676.
- [7] Zajemska M., Maroszek A., *Analiza opłacalności wykorzystania gazu koksowniczego do opalania hutniczych pieców grzewczych*, [w:] Monografie nr 48, 2015, s.420–424.
- [8] Zajemska M., *Modelowanie numeryczne składu chemicznego spalin w piecach grzewczych*, Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2013.
- [9] Zajemska M., *Analiza teoretyczno-eksperymentalna wpływu współspalania odpadów drzewnych w formie paliw reburningowych z gazem ziemnym na skład chemiczny spalin*, [w:] Drewno. Prace Naukowe, Doniesienia, Komunikaty, Vol. 55, 2012, s. 71–84.
- [10] Zajemska M., Musiał D., Poskart A., *Application of Chemkin and Comsol programs in the calculations of chemical composition of natural gas combustion products*, [in:] Combustion Science And Technology, Vol.186, Iss.2, 2014, s.153–172.

- [11] Zajemska M., Poskart A., *Możliwości zastosowania metod numerycznych do przewidywania i ograniczania emisji zanieczyszczeń z instalacji spalania stosowanych w przemyśle chemicznym i rafineryjnym*, [w:] *Przemysł Chemiczny*, nr 3, T. 92, 2013, s. 357–361.
- [12] EN 61241-10:2004 Electrical apparatus for use in the presence of combustible dust. Part 10: Classification of areas.
- [13] PN-EN 60079-101:2009 Atmosfery wybuchowe, Część 10-1: Klasyfikacja przestrzeni. Gazowe atmosfery wybuchowe.
- [14] Raport o Bezpieczeństwie ArcelorMittal Poland S.A. Oddział w Zdzeszowicach dla Zakładu o dużym ryzyku wystąpienia poważnej awarii przemysłowej (ZDR), Zdzeszowice, Styczeń 2013r.
- [15] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 9 kwietnia 2002 r. w sprawie rodzajów i ilości substancji niebezpiecznych, których znajdowanie się w zakładzie decyduje o zaliczeniu go do zakładu o zwiększonym ryzyku albo zakładu o dużym ryzyku wystąpienia poważnej awarii przemysłowej. (Dz. U. 2002 nr 58 poz. 535).
- [16] Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 8 lipca 2010 r. w sprawie minimalnych wymagań dotyczących bezpieczeństwa i higieny pracy, związanych z możliwością wystąpienia w miejscu pracy atmosfery wybuchowej (Dz. U. 2010 nr 138 poz. 931, § 7.1.).
- [17] http://www.podkontrola.pl/download/temat_wydania_nr1-2010.pdf. (data dostępu: 20.05.2016).
- [18] <http://www.atex137.pl/dokument-zabezpieczenia-przed-wybuchem/> (data dostępu: 20.05.2016).
- [19] <http://ipo.waw.pl/pl/projekt-B-R/DZPW-wzorcowy-atmosfery-pylowe.pdf>. (data dostępu: 20.05.2016).
- [20] <http://www.dzpw.pl/atex/strefy-zagrozenia-wybuchem> (data dostępu: 20.05.2016).
- [21] <http://www.ryszarddziwisinski.strefa.pl/> (data dostępu: 20.05.2016).
- [22] http://www.straz.krakow.pl/dokumenty/rodzaje_zagrozen2.pdf; 18.02.2015. (data dostępu: 20.05.2016).
- [23] <http://www.reactiondesign.com/products/chemkin/chemkin-pro/> (data dostępu: 20.05.2016).
- [24] <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/releases.html>. (data dostępu: 20.05.2016).