

**ZESZYTY  
NAUKOWE  
POLITECHNIKI  
ŚLĄSKIEJ**

**Andrzej SZŁĘK**

**BADANIA PROCESU SPALANIA PALIW  
STAŁYCH W WARSTWIE NIERUCHOMEJ**

P. 3350/01

**ENERGETYKA**

**Z. 135**



**GLIWICE 2001**

**POLITECHNIKA ŚLĄSKA**

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 1522

P. 3350/01

Andrzej SZŁĘK



**BADANIA PROCESU SPALANIA PALIW  
STAŁYCH W WARSTWIE NIERUCHOMEJ**

## OPINIODAWCY

Prof. dr hab. inż. Władysław Gajewski

Prof. dr hab. inż. Stefan Postrzednik

## KOLEGIUM REDAKCYJNE

REDAKTOR NACZELNY - Prof. dr hab. Zygmunt Kleszczewski

REDAKTOR DZIAŁU - Dr hab. inż. Andrzej Witkowski  
Profesor Politechniki Śląskiej

SEKRETARZ REDAKCJI - Mgr Elżbieta Leško

## REDAKCJA

Mgr Kazimiera Szafir

## REDAKCJA TECHNICZNA

Alicja Nowacka

Wydano za zgodą  
Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0372-9796

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej  
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice  
tel./fax 237-13-81, www.wydawnictwo.polsl.gliwice.pl,  
wydawnictwo@polsl.gliwice.pl

Nakład 100+50 egz. Ark. wyd. 7,5. Ark. druk. 7.875. Papier offset, kl. III 70x100 80 g  
Oddano i podpisano do druku 14.12.2001 r. Druk ukończono w grudniu 2001 r.  
Zam. 51/2001

Fotokopie, druk i oprawę wykonano w UKiP sc, *J&D Gębka*,  
Gliwice, ul. Pszczyńska 44, tel./fax 231-87-09

## Spis treści

1. Spis najważniejszych oznaczeń	7
2. Znaczenie spalania paliw w warstwie we współczesnej technice	9
3. Przegląd literatury	12
4. Nazewnictwo i technologie spalania w warstwie nieruchomej	14
5. Cel i zakres pracy	18
6. Badania eksperymentalne	20
6.1. Stanowisko badawcze	22
6.2. Zakres badań	26
7. Wyniki badań eksperymentalnych	29
7.1. Ogólny opis procesu	29
7.2. Prędkość propagacji frontu spalania	33
7.3. Krzywa wypalania paliwa	38
7.4. Struktura obszaru spalania	41
7.5. Proces spalania wiórów drzewnych	45
8. Model matematyczny	49
8.1. Założenia i ogólny opis modelu	50
8.2. Równania opisujące zmiany parametrów fazy gazowej	52
8.3. Równania opisujące zmiany parametrów fazy stałej	56
8.4. Strumienie międzyfazowe	60
8.5. Warunki brzegowe	64
8.6. Sposób rozwiązania	66

P.55/02

8.7. Współczynniki wrażliwości . . . . .	72
<b>9. Wyniki badań numerycznych</b>	<b>74</b>
9.1. Weryfikacja modelu . . . . .	75
9.2. Struktura obszaru spalania . . . . .	79
9.3. Prędkość spalania . . . . .	81
9.4. Analiza wrażliwości . . . . .	82
<b>10. Podstawowe wnioski praktyczne</b>	<b>90</b>
<b>11. Przykład wykorzystania wyników - sterowanie kotłem rusz- towym</b>	<b>94</b>
11.1. Problemy sterowania kotłami rusztowymi . . . . .	94
11.2. Opis kotła i przeprowadzonych badań . . . . .	96
11.3. Zarys opracowanego algorytmu . . . . .	101
<b>12. Inne możliwości zastosowania wyników</b>	<b>109</b>
<b>13. Podsumowanie</b>	<b>112</b>
<b>Literatura</b>	<b>117</b>
<b>Streszczenie</b>	<b>124</b>

## Contents

<b>1. Nomenclature</b>	<b>7</b>
<b>2. Fixed bed combustion in industrial practice</b>	<b>9</b>
<b>3. Review of the actual knowledge</b>	<b>12</b>
<b>4. Fixed bed combustion technologies</b>	<b>14</b>
<b>5. Aim of the work</b>	<b>18</b>
<b>6. Experimental investigations</b>	<b>20</b>
6.1. Experimental stand . . . . .	22
6.2. Program of the measurements . . . . .	26
<b>7. Results of the experimental investigations</b>	<b>29</b>
7.1. General description of the process . . . . .	29
7.2. Reaction front propagation velocity . . . . .	33
7.3. Carbon burn-out curve . . . . .	38
7.4. Reaction zone structure . . . . .	41
7.5. Wood-chips combustion . . . . .	45
<b>8. Mathematical model</b>	<b>49</b>
8.1. Assumptions and general description . . . . .	50
8.2. Gas phase equations . . . . .	52
8.3. Solid phase equations . . . . .	56
8.4. Mass and energy fluxes . . . . .	60
8.5. Boundary conditions . . . . .	64
8.6. Solution method . . . . .	66
8.7. Sensitivity coefficients . . . . .	72

<b>9. Results of calculations</b>	<b>74</b>
9.1. Model verification . . . . .	75
9.2. Combustion zone structure . . . . .	79
9.3. Reaction front velocity . . . . .	81
9.4. Sensitivity coefficients . . . . .	82
<b>10. Industrial application of the investigations</b>	<b>90</b>
<b>11. Example of application - traveling grate boiler</b>	<b>94</b>
11.1. Overview of grate boiler control methods . . . . .	94
11.2. Description of the measurements . . . . .	96
11.3. New algorithm for boiler control . . . . .	101
<b>12. Other potential applications</b>	<b>109</b>
<b>13. Summary and conclusions</b>	<b>112</b>
<b>References</b>	<b>117</b>
<b>Summary</b>	<b>125</b>

# 1. Spis najważniejszych oznaczeń

## Symbole łańskie:

- $A$  - pole powierzchni,  $m^2$ ,
- $C$  - koncentracja,  $kmol/m^3$ ,
- $\dot{D}$  - gęstość strumienia zgazowania pierwiastka węgla,  $kg/m^2s$ ,
- $c_p$  - ciepło właściwe,  $kJ/kgK$ ,
- $F$  - obwód,  $m$ ,
- $\dot{G}$  - gęstość strumienia odgazowania paliwa,  $kg/m^2s$ ,
- $g$  - udział gramowy składnika w fazie gazowej,
- $i$  - entalpia właściwa,  $kJ/kg$ ,
- $j$  - gęstość strumienia dyfuzji substancji,  $kg/m^2s$ ,
- $k$  - współczynnik szybkości odgazowania,
- $M$  - masa molowa,  $kg/kmol$ ,
- $n$  - ilość substancji,  $kmol$ ,
- $n_{amin}$  - minimalne zapotrzebowanie powietrza spalania,  $kmol/kg$ ,
- $\dot{S}$  - gęstość strumienia substancji,  $kg/m^2s$ ,
- $p$  - ciśnienie,  $Pa$ ,
- $\dot{q}$  - gęstość strumienia ciepła,  $kJ/m^2s$ ,
- $R$  - indywidualna stała gazowa,  $kJ/kgK$ ,
- $T$  - temperatura,  $K$ ,
- $t$  - temperatura,  $^{\circ}C$ ,
- $\dot{V}$  - strumień objętościowy,  $m^3/s$ ,
- $W_d$  - wartość opałowa,  $kJ/kg$ ,
- $w$  - prędkość,  $m/s$ ,
- $x$  - odległość,  $m$ , stopień wypalenia pierwiastka węgla,
- $y$  - udział gramowy składnika w fazie stałej,

**Symbole greckie:**

$\alpha$  - współczynnik wnikania ciepła,  $kW/m^2K$ ,

$\alpha_k$  - współczynnik szybkości reakcji,

$\beta$  - współczynnik wnikania masy,  $m/s$ ,

$\gamma$  - współczynnik wrażliwości,

$\lambda$  - współczynnik przewodzenia ciepła,  $W/mK$ ,

$\lambda_a$  - stosunek nadmiaru powietrza,

$\nu$  - współczynnik stechiometryczny reakcji chemicznej,

$\rho$  - gęstość,  $kg/m^3$ ,

$\tau$  - czas,  $s$ ,

$\zeta$  - względna strata energii, %,

$\dot{\omega}$  - wydajność reakcji chemicznej,  $kmol/m^3s$ ,

**Indeksy:**

a - powietrze,

f - front spalania,

g - gaz,

o - początkowy,

s - spaliny, faza stała,

ss - spaliny suche

## 2. Znaczenie spalania paliw w warstwie we współczesnej technice

Postęp gospodarczy i rozwój cywilizacyjny wiążą się nierozdzielnie z pozyskiwaniem, przetwarzaniem oraz użytkowaniem różnych form energii. Od samych początków rozwoju ludzkości, aż do chwili obecnej, podstawowym źródłem energii, wykorzystywanym przez człowieka, jest proces spalania paliw. Według wszelkich prognoz sytuacja ta nie zmieni się w przeciągu najbliższych kilkudziesięciu lat. Przewiduje się, że do roku 2020 udział spalania w zaspokajaniu światowych potrzeb energetycznych spadnie z obecnych 90% do 80% przy jednoczesnym wzroście bezwzględnym [3], [4], [11], [29], [62], [63].

Prognozy dotyczące przyszłości spalania nie są zgodne co do roli poszczególnych rodzajów paliw. Część ekspertów skłonna jest przypisać dominujące znaczenie paliwom stałym ze względu na ich duże zasoby oraz równomierne geograficzne rozmieszczenie, podczas gdy inni wskazują na gaz jako podstawowe źródło energii najbliższej przyszłości.

Podstawowymi argumentami przemawiającymi za paliwami gazowymi są ich stosunkowo niewielkie oddziaływanie na środowisko oraz znaczne zasoby światowe. Większość autorytetów zgadza się co do faktu, że w przyszłości wzrośnie rola spalania biomasy.

Opisane światowe tendencje rozwoju energetyki jedynie częściowo mogą zostać przeniesione na warunki krajowe.

W Polsce, posiadającej znaczne zasoby paliw stałych o dobrej jakości oraz bardzo niewielkie zasoby paliw płynnych, węgiel pozostanie prawdopodobnie podstawowym i najtańszym źródłem energii [13], [58]. W planach

rządu polskiego [66] zakłada się utrzymanie wydobycia węgla powyżej 80 mln ton rocznie w roku 2020. Należy się ponadto spodziewać wzrostu zainteresowania biomasą, która stanowić może atrakcyjne cenowo paliwo, stając się jednocześnie szansą restrukturyzacji części polskiego rolnictwa [31]. W opracowaniu Ministerstwa Ochrony Środowiska [45] zdefiniowano cel strategiczny, jakim jest zwiększenie udziału źródeł odnawialnych do 14% w roku 2020. Według autorów tego opracowania dominująca część energii odnawialnej w warunkach polskich pozyskiwana będzie ze spalania drewna. Tak więc paliwa stałe kopalne i odnawialne stanowiąc będą w najbliższej przyszłości podstawę bilansu energetycznego Polski.

Do spalania paliw stałych stosuje się kilka rodzajów technologii. W jednostkach dużej mocy paliwa stałe spalane są albo w postaci pyłu, albo w warstwie fluidalnej. W kotłach średniej mocy (do kilkudziesięciu MW) stosuje się najczęściej przesuwne bądź schodkowe ruszty mechaniczne. W jednostkach mniejszych (do 1 MW) stosowane są ruszty stałe lub tak zwane paleniska retortowe [43].

Kotły z rusztem mechanicznym oraz stałym są w Polsce bardzo rozpowszechnione jako źródła ciepła i pary technologicznej [51]. Szacuje się, że liczba kotłów z rusztem mechanicznym pracujących obecnie w Polsce przekracza 10 tysięcy sztuk. Liczbę kotłów z rusztem stałym, zaspokajających indywidualne potrzeby grzewcze użytkowników, trudno jest nawet oszacować. Producenci kotłów rusztowych cieszą się od lat dobrą koniunkturą wynikającą z niskiej i stabilnej ceny węgla oraz prostej obsługi tego typu urządzeń. W przyszłości kotły rusztowe mogą znaleźć zastosowanie do spalania lub współspalania odpadów oraz różnego rodzaju biomasy. Wszystkie te fakty pozwalają przypuszczać, że kotły rusztowe jeszcze wiele lat pełnić będą ważną rolę w polskiej energetyce.

Podstawową wadą kotłów rusztowych jest ich niska sprawność oraz, związana z nią, wysoka emisja substancji szkodliwych na jednostkę wyprodukowanej energii użytecznej. Taki stan rzeczy wynika z niedostatecznego poznania zjawisk zachodzących podczas spalania paliw stałych w warstwie nieruchomej. Przez wiele lat badania nad spalaniem paliw stałych koncentrowały się na spalaniu ich w postaci pyłowej oraz w warstwie fluidalnej, podczas gdy technologia spalania w warstwie nieruchomej uważana była za przestarzałą i niewartą zainteresowania. Dopiero w ostatnich latach obserwuje się powolny powrót do badań nad tą technologią. Wynika to głównie z niskiej ceny energii chemicznej zawartej w węglu oraz wzrostu znaczenia spalania biomasy i odpadów.

Niniejsza praca jest próbą częściowego wypełnienia opisywanej luki w teorii spalania.

### 3. Przegląd literatury

Jak wspomniano na wstępie, spalanie paliw stałych w warstwie nieruchomej jest słabo poznane zarówno od strony eksperymentalnej, jak i obliczeniowej. Ten stan wiedzy kontrastuje z rolą, jaką odgrywają kotły rusztowe w polskiej energetyce [17]. Popularność kotłów rusztowych wynika z ich prostej budowy i eksploatacji, dużej elastyczności oraz wykorzystywania węgla, który pozostaje najtańszym paliwem na wielu rynkach, w tym i polskim.

Nieliczne prace dotyczące kotłów rusztowych dotyczą najczęściej konkretnych potrzeb ich użytkowników i nie wnikają w naturę procesu spalania. Takie podejście znaleźć można w pracach [2], [14], [25], [28], [38], [39], [40], [41]. Niemniej jednak wyniki uzyskane w ramach wymienionych prac wskazują, że kotły rusztowe mogą osiągnąć bardzo niewielkie emisje substancji toksycznych, przy dobrym poziomie sprawności energetycznej.

Braki literaturowe najwyraźniej uwidaczniają się w książkach poświęconych spalaniu. Przykładowo książki [1], [4], [10], [16], [22], [24], [27], [30], [34], [43], [59], [61], [64] albo w ogóle nie zawierają informacji na temat techniki spalania paliw stałych w złożu nieruchomym, albo poświęcają jej zaledwie kilka stron. Należy przy tym podkreślić, że pozycje [43], [59] oraz [64] są monografiami poświęconymi wyłącznie spalaniu węgla. Wszelchstronny przegląd literatury przedstawiony jest w [43], jednak autor tej pozycji przyznaje na przykład, że nie udało mu się znaleźć pracy na temat modelowania procesu spalania paliwa stałego w warstwie nieruchomej. Podobnie w przeglądowej publikacji [6] na temat modelowania spalania węgla kwestia spalania w złożu nieruchomym została w ogóle pominięta.

Dopiero w ostatnich latach zaczynają się pojawiać publikacje, w których podejmowane są próby wyjaśnienia zjawisk zachodzących w warstwie paliwa [5], [12], [32], [35], [47], [48], [57]. Również w ostatnich latach stworzony

został numeryczny model spalania i zgazowania w warstwie nieruchomej [8], [44]. Niestety, publikacje jemu poświęcone koncentrują się niemal wyłącznie na analizie procesu zgazowania.

Obszerniejszą analizę zjawisk zachodzących w warstwie nieruchomej znaleźć można w starszym piśmiennictwie, szczególnie rosyjskojęzycznym. Bardzo dobry przegląd osiągnięć w tej dziedzinie przedstawiono przykładowo w [21]. Jednak w pracy tej nie przedstawiono zaawansowanych modeli numerycznych spalania, gdyż w czasie jej powstawania elektroniczna technika obliczeniowa była na zbyt wczesnym etapie swojego rozwoju. Niemniej jednak praca ta stanowi cenną pomoc w zakresie ogólnego opisu zjawiska spalania paliw stałych w warstwie nieruchomej.

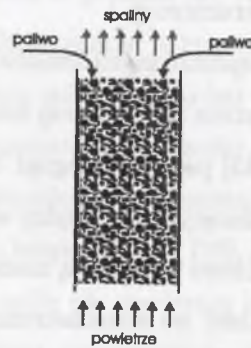
Na szczęście, pomimo wspomnianych braków literaturowych, w modelowaniu spalania węgla w warstwie nieruchomej można się oprzeć na modelach zgazowania. Przykładowo [43] podaje przegląd 37 różnych modeli zgazowania w złożu nieruchomym różniących się między sobą przyjętymi założeniami. Bardzo przejrzysto i szczegółowo opisane są modele zgazowania w [60]. Dużo informacji można także znaleźć we wszechstronnej pracy [32], która jednak poświęcona jest spalaniu odpadów. Wymienione pozycje literaturowe stanowią nieocenioną pomoc w analizie procesów spalania węgla w złożu.

W modelowaniu procesów spalania w warstwie nieruchomej natrafia się na problemy natury numerycznej. Jak wykazano w dalszej części tej pracy, spalanie węgla w złożu nieruchomym wykazuje pewne podobieństwa do spalania gazu. Z tego względu metody numeryczne stosowane do analizy spalania gazu mogą służyć za wskazówkę odnośnie do sposobu rozwiązywania zagadnień związanych ze spalaniem paliw stałych w złożu nieruchomym. Szczególnie cenne w tej mierze okazały się pozycje [4], [18], [61].



#### 4. Nazewnictwo i technologie spalania w warstwie nieruchomej

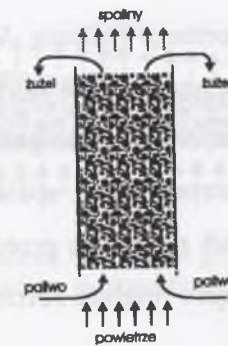
Przez spalanie w **warstwie** lub **złożu stałym** paliw stałych rozumie się taką organizację procesu spalania, w której ziarna paliwa pozostają względem siebie nieruchome lub przemieszczają się z niewielkimi prędkościami wynikającymi na przykład z osuwania się złoża w miarę jego wypalania, natomiast powietrze dopływa do strefy spalania poprzez przestrzenie między cząstkami [43]. Istotnym czynnikiem warunkującym przebieg procesu spalania jest wzajemny kierunek przepływu powietrza oraz paliwa.



Rys.4.1. Schemat organizacji spalania w złożu przy przeciwnym kierunku dostarczenia powietrza i paliwa

Fig.4.1. Fixed bed combustion with air and fuel supplied to opposite sides of the bed

W najstarszej metodzie spalania w złożu nieruchomym paliwo dostarczane jest z przeciwnej strony złoża w stosunku do dopływu powietrza (rys.4.1). Ze względu na fakt, że kierunek przepływu paliwa jest przeciwny do kierunku przepływu powietrza, spalanie takie nazywane będzie **spalaniem przeciwpładowym**. Spotyka się także mniej poprawne określenie - **spalanie dolne**. Paliwo dostarczane do złoża przechodzi kolejno przez fazę suszenia, odgazowania, zgazowania, spalania oraz wychładzania pozostałości [34]. Taka



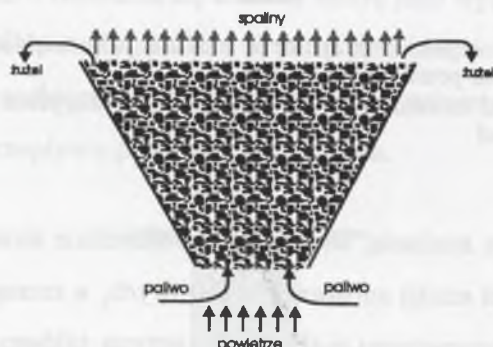
Rys.4.2. Schemat organizacji spalania w złożu przy wspólnym kierunku dostarczenia powietrza i paliwa

Fig.4.2. Fixed bed combustion with air and fuel supplied to the same side of the bed

organizacja procesu spalania, choć nadal powszechnie stosowana, prowadzi do bardzo wysokich emisji substancji szkodliwych, a szczególnie produktów niecałkowitego i niezupełnego spalania. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest to, że produkty odgazowania zawierające ciężkie węglowodory wydzielane do fazy gazowej przepływają do strefy suszenia, gdzie ulegają ochłodzeniu, zanim ulegną całkowitemu spalaniu. Z tych względów urządzenia wykorzystujące spalanie przeciwpładowe paliw stałych powinny być wycofywane ze stosowania. W praktyce doprowadzanie paliwa najczęściej odbywa się cyklicznie, a szczególnie wysokie emisje substancji szkodliwych występują w chwili, gdy następuje uzupełnianie złoża zimnym paliwem, które przerywając łańcuch reakcji spalania generuje ogromne stężenia produktów niezupełnego spalania w spalinach.

W ostatnich latach coraz powszechniej stosowana jest metoda spalania, w której paliwo dostarczane jest z tej samej strony złoża co powietrze. Taka organizacja procesu (rys.4.2) spalania nosi nazwę **spalania współprądowego** lub mniej poprawnie **spalania górnego**. W odróżnieniu od poprzedniej technologii produkty odgazowania przechodzą przez strefę spalania znajdu-

jąc w niej dobre warunki do zupełnego spalania. Wadą tego typu konstrukcji jest konieczność wymuszania przepływu paliwa, co realizowane jest najczęściej przez podajniki ślimakowe, wtłaczające paliwo do dolnej części złoża. W konstrukcjach kotłów wykorzystujących spalanie współprądowe stosuje się najczęściej stożkowy kształt rusztu, co przedstawiono na rys.4.3. Taki rodzaj rusztu nazywany jest często rusztem retortowym. Dzięki stożkowa-



Rys.4.3. Schemat organizacji spalania w palenisku retortowym

Fig.4.3. Fixed bed combustion in underfeed furnace

temu ukształtowaniu rusztu czas przebywania paliwa na nim znacznie rośnie. W dalszej części pracy wykazano, że stożkowy kształt rusztu w spalaniu współprądowym ma swoje uzasadnienie teoretyczne.

Zarówno przeciwprądowe, jak i współprądowe spalanie paliw stałych znajduje przede wszystkim zastosowanie w małych kotłach, służących do ogrzewania indywidualnego lub niewielkich obiektów.

W jednostkach większej mocy stosuje się zazwyczaj mechaniczne ruszty przesuwne (rys.4.4), w których paliwo pozostaje nieruchome względem rusztu poruszając się wraz z nim w kierunku poprzecznym w stosunku do przepływu powietrza. Dopływ powietrza pod ruszt zorganizowany jest najczęściej tak, by możliwa była zmiana strumienia doprowadzanego powietrza do poszczególnych stref.



Rys.4.4. Organizacja spalania na ruszcie przesuwnym

Fig.4.4. Fixed bed combustion in traveling-grate furnace

Należy zwrócić uwagę, że istnieje duże podobieństwo między spalaniem w palenisku retortowym (rys.4.3) i na ruszcie przesuwnym (rys.4.4). W obu tych technikach zapłon paliwa dokonywany jest po przeciwnej stronie złoża w stosunku do dopływu powietrza, dzięki czemu produkty odgazowania natrafiają na swej drodze na gorącą strefę spalania, gdzie ulegają spalaniu. Również wzajemny kierunek rozprzestrzeniania się strefy spalania i przepływu powietrza pozostaje taki sam. Z tego względu zjawiska zachodzące podczas spalania paliwa na ruszcie przesuwnym są bardzo podobne do zjawisk zachodzących podczas spalania na ruszcie retortowym.

W Polsce istnieje wielu producentów zarówno kotłów z rusztem mechanicznym przesuwnym, jak i z paleniskiem retortowym. Przykładowo kotły dużej mocy produkuje Sefako [71], mniejsze z rusztem przesuwnym znajdują się w ofercie Energoinwestu [67], a paleniska retortowe stosowane są w wyrobach firm: Gizex [68], Metachem [69] i Urzoń [70]. Moc cieplna wymienionych kotłów zawiera się w granicach od 25 kW dla urządzeń przeznaczonych do indywidualnych potrzeb grzewczych oraz do 30 MW w przypadku urządzeń przeznaczonych dla ciepłownictwa i energetyki przemysłowej. Szeroki przegląd konstrukcji kotłów wykorzystujących spalanie paliw stałych w warstwie nieruchomej przedstawiono na przykład w [20], [33].

## 5. Cel i zakres pracy

Nadrzędnym celem niniejszej pracy jest poszerzenie wiedzy na temat spalania paliw stałych w warstwie nieruchomej. W szczególności celem pracy jest:

- opracowanie metodyki badań eksperymentalnych oraz sposobu interpretacji ich wyników,
- lepsze poznanie zjawisk zachodzących podczas spalania w złożu nieruchomym,
- opracowanie metodyki badań numerycznych procesu, a w tym budowa modelu matematycznego i jego implementacja w postaci programu komputerowego,
- identyfikacja czynników istotnie wpływających na przebieg procesu spalania.

Ponadto celem pracy było wykazanie, że możliwe jest przemysłowe zastosowanie wniosków i wyników przeprowadzonych badań do sterowania pracą kotła rusztowego opalanego węglem. Wskazano także inne możliwości zastosowania wyników pracy w praktyce przemysłowej.

Przedstawione cele zdecydowano się osiągnąć zarówno poprzez badania laboratoryjne, obliczenia numeryczne, jak i pomiary przemysłowe. Tak więc w skład niniejszej pracy weszły następujące zadania cząstkowe:

- budowa stanowiska laboratoryjnego dla potrzeb badania spalania paliw stałych,
- pomiary laboratoryjne procesu spalania dla wybranych paliw stałych,
- opracowanie równań matematycznych opisujących proces spalania, opracowanie metody numerycznej ich rozwiązania,

- utworzenie kodu komputerowego ujmującego opracowane równania oraz algorytmy ich rozwiązania,
- obliczenia procesu spalania, a także współczynników czułości względem podstawowych parametrów paliwa i procesu,
- pomiary przemysłowe w jednej z elektrowni centralnej Polski, wykorzystującej kocioł OR-32 do produkcji pary, a w tym próby sterowania kotłem z zastosowaniem wniosków uzyskanych w pracy.

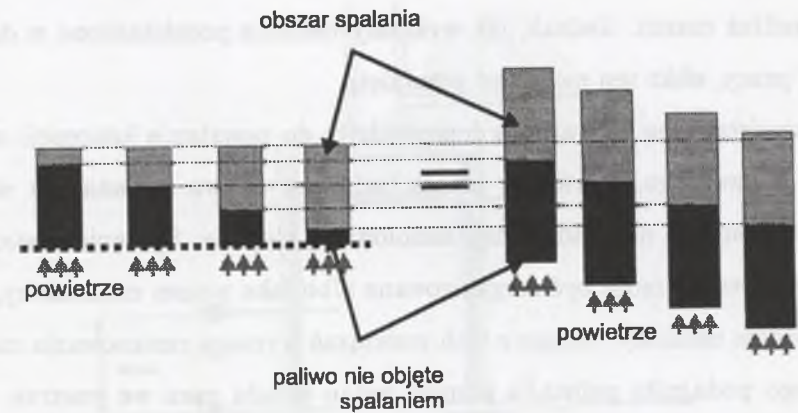
Zarówno badania laboratoryjne, jak i obliczenia numeryczne przeprowadzono w laboratoriach badawczych Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Analizy techniczne i elementarne zlecono Laboratorium Fizykochemii Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze.

## 6. Badania eksperymentalne

Spalanie jest zjawiskiem niezwykle skomplikowanym, łączącym w sobie elementy mechaniki płynów, turbulencji, przepływu ciepła oraz kinetyki chemicznej. W przypadku spalania paliw stałych zagadnienie dodatkowo komplikują procesy wyzwalania i ewolucji części lotnych, reakcji heterogenicznych na powierzchni fazy stałej, dyfuzji w porach paliwa, spiekania ziaren, topnienia popiołu i wiele innych. Z powyższych względów w poznaniu procesów spalania, a szczególnie spalania paliw stałych, dominują metody eksperymentalne. Z drugiej jednak strony uogólnienie wyników badań eksperymentalnych jest znacznie trudniejsze niż wyników obliczeń numerycznych. Chcąc połączyć wady i zalety obu podejść w niniejszej pracy zdecydowano się wykonać zarówno badania eksperymentalne, jak i numeryczne.

Celem badań eksperymentalnych było przede wszystkim rozpoznanie zjawiska oraz zebranie danych do weryfikacji modelu matematycznego, podczas gdy podstawowym celem badań numerycznych była próba uogólnienia osiągniętych rezultatów.

Jak wspomniano na wstępie, spalanie przeciwprądowe paliwa stałego jest techniką niezwykle uciążliwą ekologicznie i dlatego powinno się dążyć do jej eliminacji. Z tego względu autor niniejszej pracy ograniczył się do analizy spalania współprądowego oraz spalania na ruszcie przesuwym. Obie te techniki są bardzo podobne do siebie. Podobieństwo to najłatwiej można dostrzec analizując rys.6.1, przedstawiający historię porcji paliwa na ruszcie przesuwym oraz odpowiadające obszary złoża współprądowego. Można przyjąć, że parametry w złożu stałym w kolejnych fazach spalania porcji paliwa na ruszcie odpowiadają parametrom z różnych obszarów złoża współprądowego. Innymi słowy parametry w złożu przedstawione jako funkcja odległości od umownej granicy między zaznaczonym obszarem spalania oraz obszarem pa-



Rys.6.1. *Historia spalania porcji paliwa na ruszcie przesuwym (strona lewa) oraz równoważne obszary spalania w złożu współprądowym (strona prawa)*

Fig.6.1. *History of solid fuel on moving grate (left side) and corresponding combustion zones in cocurrent flow fixed bed combustion (right side)*

liwa nie objętego spalaniem są identyczne w obu złożach. Założenie takie jest prawdziwe pod warunkiem małego wpływu strat ciepła na górnej krawędzi złoża przesuwym. W istocie współczynnik przewodzenia ciepła paliw stałych jest bardzo niski [59], a zatem wpływ warunków panujących na górnej powierzchni złoża na procesy zachodzące w jego wnętrzu może być pominięty.

Podczas spalania na ruszcie przesuwym, a w mniejszym stopniu także w złożu retortowym, wymiary poprzeczne warstwy paliwa są dość duże, a zatem środkowy obszar paliwa, dzięki małemu współczynnikowi przewodzenia ciepła warstwy, spala się w warunkach izolacji cieplnej. Jest to bardzo istotne spostrzeżenie z punktu widzenia koncepcji stanowiska badawczego. Zgodnie z tym spostrzeżeniem spalanie powinno odbywać się w warunkach zaizolowania bocznych powierzchni złoża.

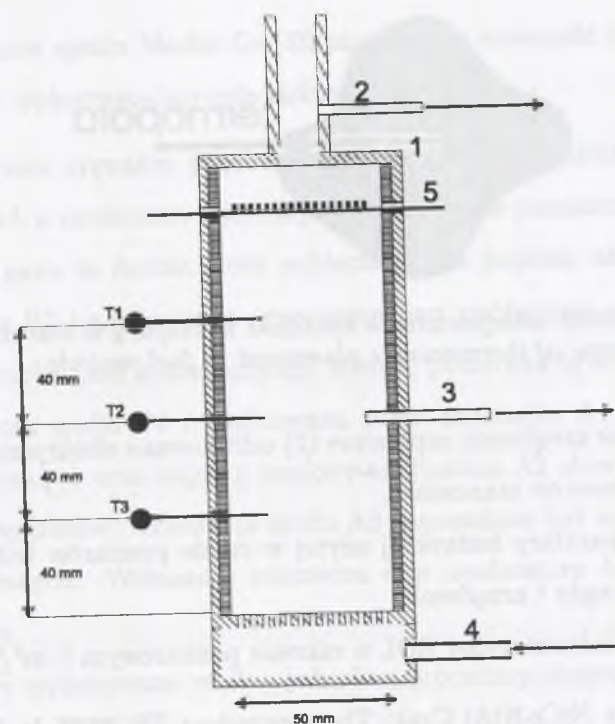
W warunkach rzeczywistych spalania na ruszcie przesuwym kolejne porcje paliwa nie są od siebie odizolowane, a w konsekwencji ciepło może przepły-

wać wzdłuż rusztu. Jednak, jak wykazały badania przedstawione w dalszej części pracy, efekt ten może być pominięty.

Przedstawione rozważania doprowadziły do powstania koncepcji stanowiska badawczego, w którym porcja badanego paliwa spalana jest w niewielkiej komorze doświadczalnej, zaizolowanej cieplnie. Spalanie w stanowisku badawczym może być zorganizowane albo jako proces nieustalony, albo jako proces ustalony. Drugie z tych rozwiązań wymaga zastosowania mechanicznego podajnika paliwa, a pomiar zmian składu gazu we wnętrzu złoża wymaga zastosowania przesuwnej sondy pomiarowej. Z tego względu zdecydowano się na zastosowanie stanowiska, w którym zachodzi proces nieustalony. W takim przypadku istnieje możliwość zastosowania nieruchomej sondy, która umożliwi pomiar składu gazu jako funkcji czasu spalania.

### 6.1. Stanowisko badawcze

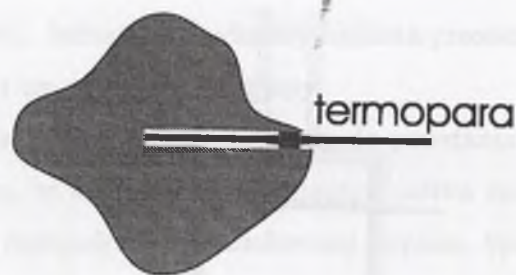
Zgodnie z przedstawionymi rozważaniami jako stanowisko badawcze zastosowano niewielkich rozmiarów komorę spalania zaizolowaną cieplnie. Średnica komory została dobrana eksperymentalnie jako kompromis między zbyt dużymi stratami ciepła (mimo izolacji cieplnej) z komory o małej średnicy a nierównomiernym rozprzestrzenianiem się spalania w komorze o średnicy zbyt dużej. Oczywiście średnica komory powinna być znacznie większa od maksymalnej średnicy ziaren paliwa. Na rys.6.2 przedstawiono schemat zasadniczego elementu zbudowanego stanowiska badawczego. Stalowa komora z wewnętrznym wyłożeniem ceramicznym miała wysokość 200 mm i średnicę wewnętrzną 50 mm. Wzdłuż wysokości komory umieszczone były trzy termopary: T1, T2 oraz T3, mierzące temperaturę fazy stałej. Ich końcówki umiejscowione były we wnętrzu ziaren węgla, co przedstawia rys.6.3. Podczas umieszczania paliwa w komorze zwracano szczególną uwagę na to,



Rys.6.2. Schemat stanowiska badawczego; 1-korpus komory, 2-króciec poboru spalin opuszczających złożo, 3-króciec poboru spalin ze środka złoża, 4-króciec doprowadzający powietrze, 5-urządzenie zapłonowe, T1, T2, T3 - termopary

Fig.6.2. Scheme of the test stand; 1-combustion chamber, 2-exit gas uptake, 3-gas uptake from the middle of the bed, 4-combustion air supply, 5-ignition device, T1, T2, T3 - thermocouples

by końcówki termopar znajdowały się w osiach otworów, przez które były wprowadzane tak, by dokładnie znana była ich pozycja w złożu. Próbkę gazu do analizy pobierane były w sposób ciągły z dwóch punktów, przez dwa niezależne układy przygotowania spalin. Pierwsza sonda poboru gazu umiejscowiona była na wylocie z komory spalania (2), podczas gdy druga w środku złoża (3) na wysokości termopary T2. Powietrze spalania (4) doprowadzane było do spodu złoża, przy czym jego strumień był mierzony rotametrem i regulowany reduktorem. W górnej części komory umieszczone



Rys.6.3. Schemat umiejscowienia końcówki termopary w ziarnie paliwa  
 Fig.6.3. Scheme of thermocouple placement in fuel particle

było elektryczne urządzenie zapłonowe (5) odizolowane elektrycznie od przewodzących elementów stanowiska.

W skład aparatury badawczej użytej w czasie pomiarów wchodziły następujące przyrządy i urządzenia:

- R - rotametr laboratoryjny ROL o zakresie pomiarowym  $5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,
- T - termopary NiCr-NiAl Czaki Thermoproduct TP-202K-1a-600 o średnicy elementu pomiarowego 1 mm,
- P1 - układ przygotowania spalin Madur GD-10 składający się z grzanego węża, pompy oraz chłodnicy,
- P2 - układ przygotowania gazu M&C PSS-2 składający się z pompy i chłodnicy,
- A1 - analizator spalin Infracal 4000 analizujący stężenie  $O_2$  0-21%,  $CO_2$  0-20%,  $CO$  0-10%, działający na zasadzie pochłaniania promieniowania podczerwonego z wyjątkiem stężenia  $O_2$ , które mierzone były przez celę elektrochemiczną,
- A2 - analizator spalin Fisher-Rosemount NGA2000 analizujący stężenie  $CO_2$  0-20%,  $CO$  0-10% na zasadzie pochłaniania promieniowania podczerwonego,

A3 - analizator spalin Madur GA-20 analizujący zawartość  $O_2$  w zakresie 0-21%, wykorzystujący celę elektrochemiczną,

RE - rejestrator sygnałów prądowych i napięciowych Agilent Technologies 34-970A o możliwości rejestracji do 40 kanałów pomiarowych.

Próbka gazu ze środka złoża pobierana była poprzez układ przygotowania spalin P1 i analizowana przez szeregowo podłączone analizatory A2 oraz A3. Próbka gazu opuszczającego komorę pobierana była poprzez układ przygotowania spalin P2 i analizowana przez analizator A1. Sygnały napięciowe termopar oraz sygnały prądowe analizatora A2 zbierane były przez rejestrator sygnałów. Analizator spalin A3 wyposażony był we własny układ zbierania danych. Wskazania rotametru oraz analizatora A1 rejestrowane były ręcznie.

Pomiary wykonywano według jednolitej procedury obejmującej następujące punkty:

- badaną próbkę paliwa ważono i umieszczano w komorze spalania, zwracając uwagę na zachowanie jednakowych warunków zasypywania paliwa,
- na wierzchniej stronie próbki umieszczano spiralę grzejną, po czym komorę zamykano i izolowano dodatkowo warstwą wełny mineralnej,
- uruchamiano urządzenie rejestrujące,
- włączano zasilanie spirali grzejnej na okres 2 minut,
- prowadzono pomiary do momentu, gdy w końcowym etapie spalania wszystkie termopary wskazywały temperaturę niższą niż  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , a stężenie  $CO_2$  było niższe od 0,2%,
- pozostałość po spalaniu poddawano analizie na zawartość części palnych.

Każdy pomiar powtarzano trzykrotnie a do dalszej analizy wykorzystywano ten, który charakteryzował się najmniejszymi przypadkowymi zmianami mierzonych wielkości.

## 6.2. Zakres badań

Do badań eksperymentalnych zastosowano polskie węgle energetyczne z różnych kopalń, przeznaczone do spalania w kotłach rusztowych oraz wióry drzewne świerkowe jako przykład biomasy. Analiza techniczna i elementarna wykonana w akredytowanym laboratorium Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze tych paliw przedstawiona jest w tabl.5.1.

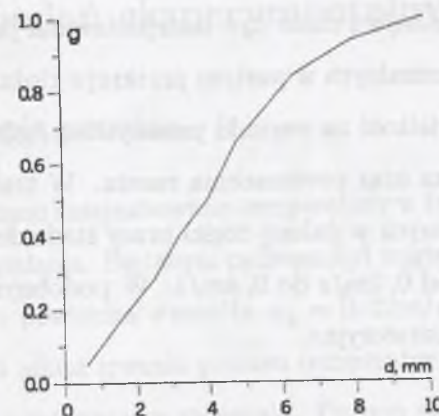
Tablica 5.1

Skład elementarny i zawartość części lotnych badanych paliw. Litery oznaczają odpowiednio udział gramowy węgla, wodoru, azotu, siarki, wilgoci oraz popiołu

Paliwo	c	h	n	s	w	p	V <sup>a</sup>
KWK "Rymer"	61,78	3,64	1,15	0,71	2,69	26,19	27,49
KWK "Sośnica"	66,57	3,75	1,14	0,91	1,87	19,90	27,87
KWK "Szczygłowice"	63,80	3,84	1,13	0,94	1,82	22,25	27,13
KWK "Chwałowice"	48,41	3,39	0,93	1,02	3,62	31,83	32,83
KWK "Rozbark"	69,14	4,23	1,25	0,78	2,02	15,61	29,16
drewno	49,23	6,54	0,90	0,07	-	4,12	

Paliwa spalane były w stanie analitycznym, a zatem zawartość wilgoci odbiegała od stanu roboczego paliwa. Zdecydowanie najwięcej uwagi poświęcono paliwu z KWK "Rozbark", gdyż ten właśnie węgiel spalany był w elektrociepłowni, w której prowadzono badania przemysłowe.

W celu określenia rozkładu średnic ziaren paliwa przeprowadzono analizę sitową węgla z KWK "Rozbark", której wynik przedstawiono na rys.6.4. Na



Rys.6.4. Udział gramowy ziaren o średnicy mniejszej od danej w funkcji średnicy ziarna. Węgiel KWK "Rozbark"  
Fig. 6.4. Gram fraction of the fuel particles as a function of particle diameter

rysunku tym przedstawiono udział gramowy ziaren  $g$  o średnicy mniejszej od zadanej jako funkcję tej średnicy. Pozostałe węgle wykazywały zbliżone wyniki analizy. Jednak w celu wyeliminowania ewentualnego wpływu rozmiaru ziaren na wyniki pomiarów węgiel przygotowany tak, by miały takie same rozkłady średnic ziaren, jak węgiel z KWK "Rozbark". Dokonano tego poprzez rozdzielanie ziaren na sitach a następnie ponowne zmieszanie w proporcjach wynikających z przebiegu funkcji przedstawionej na rys.6.4. Wymienione w tabl.5.1 drewno świerkowe miało postać wiórów pochodzących ze stolarni.

Do badań użyto także karbonizatu węgla z KWK "Rozbark", otrzymanego poprzez wygrzanie tego paliwa w temperaturze  $850^{\circ}\text{C}$  bez dostępu tlenu. Badania spalania karbonizatu przeprowadzone zostały w celu oceny wpływu zawartości części lotnych na przebieg procesu.

Ważnym parametrem wpływającym na przebieg procesu spalania jest ilość dopływającego powietrza spalania. Zdaniem autora najważniejszą jest ją przedstawić jako strumień powietrza wyrażony w  $m_n^3/s$ , odniesiony do powierzchni przekroju poprzecznego złoża. Taka miara ilości dopływającego

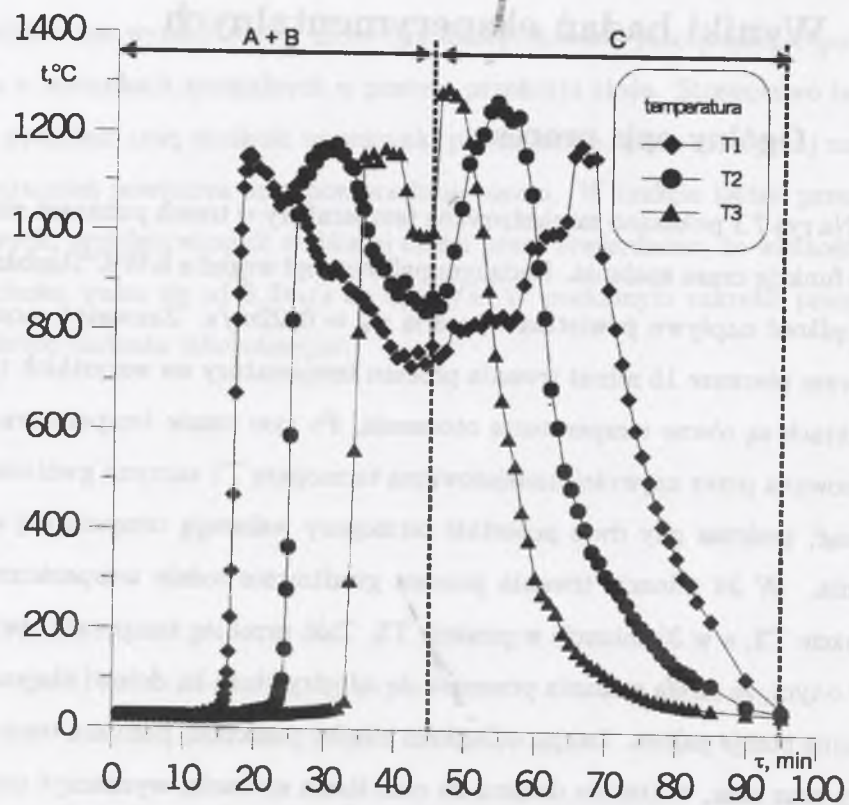
powierza ma wymiar  $m/s$  i może być interpretowana jako prędkość powietrza w warunkach normalnych w pustym przekroju złoża. Stosunkowo łatwo jest przenieść taką wielkość na warunki przemysłowe, gdzie zazwyczaj znane są strumień powietrza oraz powierzchnia rusztu. W trakcie badań przemysłowych, przedstawionych w dalszej części pracy stwierdzono, że wielkość tej prędkości waha się od  $0,2m/s$  do  $0,4m/s$ . W podobnym zakresie przeprowadzono badania laboratoryjne.

## 7. Wyniki badań eksperymentalnych

### 7.1. Ogólny opis procesu

Na rys.7.1 pokazano zarejestrowane temperatury w trzech punktach złoża jako funkcję czasu spalania. Badanym paliwem był węgiel z KWK "Rozbark", a prędkość napływu powietrza wynosiła  $w_a = 0,22m/s$ . Zauważyć można, że przez pierwsze 15 minut trwania procesu temperatury we wszystkich tych punktach są równe temperaturze otoczenia. Po tym czasie temperatura rejestrowana przez najwyższą umiejscowioną termoparę T1 zaczyna gwałtownie rosnąć, podczas gdy dwie pozostałe termopary wskazują temperaturę otoczenia. W 24 minucie trwania procesu gwałtownie rośnie temperatura w punkcie T2, a w 33 minucie w punkcie T3. Taki przebieg temperatur świadczy o tym, że strefa spalania przesuwa się od góry złoża ku dołowi obejmując kolejne porcje paliwa. Znając odległości między punktami pomiaru temperatury oraz czas, w którym dociera do nich strefa spalania, wyznaczyć można prędkość przemieszczania się frontu, a na tej podstawie czas, w którym front spalania dociera do dolnej krawędzi złoża i nie mogąc rozprzestrzeniać się dalej - zanika. Dla analizowanego przypadku czas ten wynosi 45 minut. W tym momencie zaobserwować można wzrost temperatur T1, T2 i T3, przy czym wzrost ten jest najszybszy w dolnej części złoża. Wynika to z tego, że od spodu złoża doprowadzane jest powietrze, a zatem tam panuje najwyższe stężenie tlenu i, co za tym idzie, tam możliwe jest najintensywniejsze zachodzenie egzotermicznych reakcji spalania. Po pewnym czasie temperatura złoża zaczyna maleć, osiągając ponownie wartość temperatury otoczenia, przy czym można zauważyć, że wychładzanie złoża następuje od dołu ku górze. Podsumowując analizę rys.7.1 można stwierdzić, że proces spalania węgla w złożu dzieli się na 3 następujące etapy:





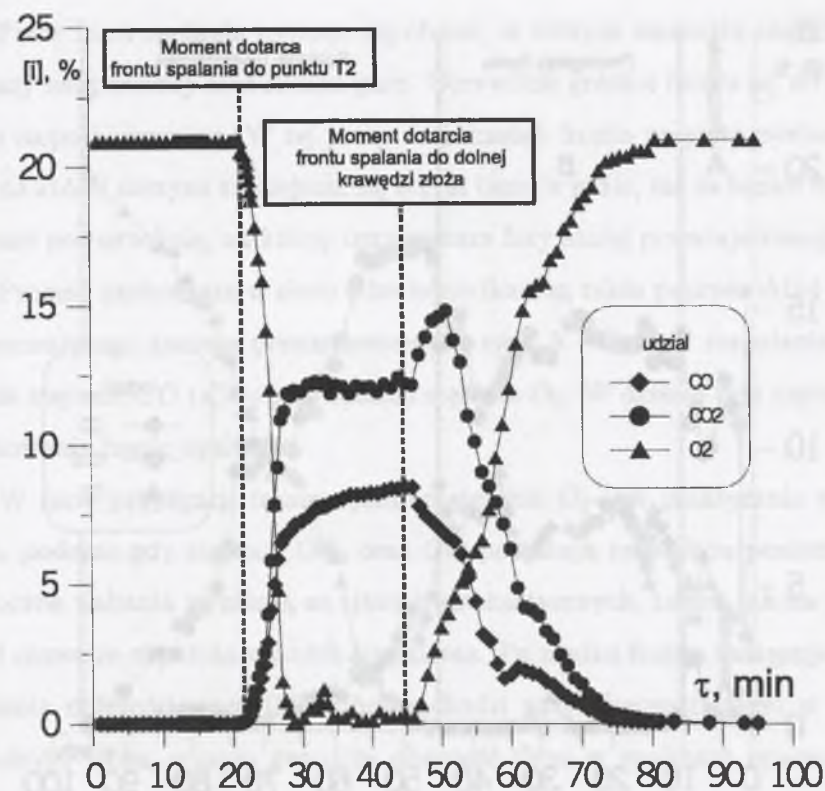
Rys.7.1. Temperatury w punktach pomiarowych jako funkcje czasu. Węgiel z KWK "Rozbark", prędkość napływu powietrza  $w_a = 0,22\text{m/s}$

Fig.7.1. Temperatures at three locations as a functions of time. Rozbark coal, air velocity  $w_a = 0,22\text{m/s}$

A - zapłon i formowanie się frontu spalania,

B - propagację frontu spalania w kierunku przeciwnym do przepływu powietrza, a więc ku dołowi,

C - spalanie objętościowe, które początkowo najintensywniej przebiega w dolnej części złoża ze względu na większą koncentrację tlenu. W efekcie substancja palna paliwa ulega szybszemu wypaleniu w dolnej części złoża, co ujawnia się wcześniejszym spadkiem temperatur w tej jego części.

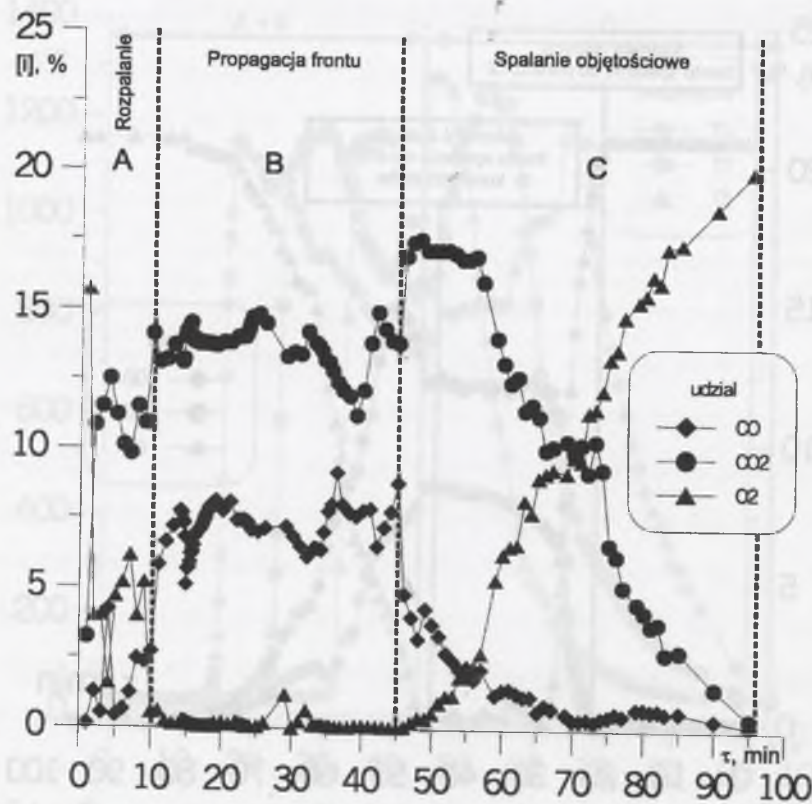


Rys.7.2. Skład gazu w punkcie T2 jako funkcja czasu spalania. Węgiel z KWK "Rozbark", prędkość napływu powietrza  $w_a = 0,22\text{m/s}$

Fig.7.2. Gas composition in the location of the T2 thermocouple as a function of time. Rozbark coal, air velocity  $w_a = 0,22\text{m/s}$

Kolejne informacje na temat procesu spalania w warstwie przynosi analiza przebiegu stężeń podstawowych składników gazu w środku złoża (na wysokości termopary T2), przedstawionych na rys.7.2.

Zauważyć można, że do chwili dotarcia do punktu T2 frontu spalania skład gazu odpowiada świeżemu powietrzu, co świadczy o tym, że poniżej punktu T2 nie zachodzą reakcje spalania. W momencie, w którym do punktu T2 dociera front reakcji, stężenie  $O_2$  gwałtownie spada, czemu towarzyszy wzrost stężenia zarówno  $CO_2$ , jak i  $CO$ . Po spadku stężenia  $O_2$



Rys.7.3. Skład gazu opuszczającego komorę spalania jako funkcja czasu spalania. Węgiel z KWK "Rozbark", prędkość napływu powietrza  $w_a = 0,22\text{m/s}$

Fig.7.3. Gas composition at the exit of the furnace as a function of time. Rozbark coal, air velocity  $w_a = 0,22\text{m/s}$

do zera, stężenie  $CO$  nadal nieznacznie rośnie, czemu towarzyszy niewielki spadek stężenia  $CO_2$ , co świadczy o zachodzeniu reakcji zgazowania w strefie bezpośrednio za frontem spalania. Zachodzenie reakcji heterogenicznych za frontem spalania świadczy o tym, że nie cała substancja palna ulega spalaniu we froncie spalania. Po czasie, w którym front spalania dociera do spodniej części złoża i zanika, obserwuje się wzrost stężenia  $O_2$  i  $CO_2$ , czemu towarzyszy spadek stężenia  $CO$ .

Przez front spalania rozumie się obszar, w którym zachodzą zasadnicze zmiany temperatury oraz składu gazu. Oczywiście granice frontu są, do pewnego stopnia, umowne. W tej pracy za początek frontu przyjęto powierzchnię, na której zaczyna zmniejszać się udział tlenu w gazie, zaś za koniec frontu uznano powierzchnię, na której temperatura fazy stałej przestaje rosnąć.

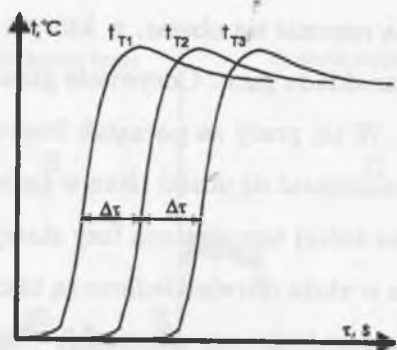
Procesy zachodzące w złożu odzwierciedlone są także poprzez skład gazu opuszczającego komorę przedstawiony na rys.7.3. W fazie rozpalania (A) rośnie stężenie  $CO$  i  $CO_2$  przy spadku stężenia  $O_2$ . W okresie tym następuje formowanie frontu spalania.

W fazie propagacji frontu spalania stężenie  $O_2$  jest praktycznie równe zero, podczas gdy stężenia  $CO_2$  oraz  $CO$  pozostają na stałym poziomie, a widoczne wahania wynikają ze zjawisk stochastycznych, takich jak na przykład osuwanie się złoża wskutek wypalania. Po zaniku frontu następuje faza spalania objętościowego (C), która zachodzi przy obecności tlenu w całej wysokości złoża, o czym świadczy obecność tlenu w spalinach opuszczających komorę. Obserwowane na rys.7.3 zmiany udziału składników w fazie propagacji frontu spalania wynikają ze zjawisk stochastycznych, z których najważniejsze to osypywanie się złoża zachodzące w miarę jego wypalania.

## 7.2. Prędkość propagacji frontu spalania

Przedstawione w poprzednim rozdziale wyniki świadczą o tym, że przy współprądowym spalaniu paliwa stałego w warstwie nieruchomej występuje zjawisko propagacji frontu spalania wykazujące pewne podobieństwo do propagacji płomienia w mieszaninie gazowej. Z przebiegu temperatur w punktach złoża określić można prędkość rozprzestrzeniania się tego frontu. Wynika ona z następującego wzoru:

$$w = \frac{\Delta x}{\Delta \tau} \quad (7.1)$$



Rys.7.4. Schemat przebiegu zmian temperatur w czasie  
Fig.7.4. Temperatures as a function of time

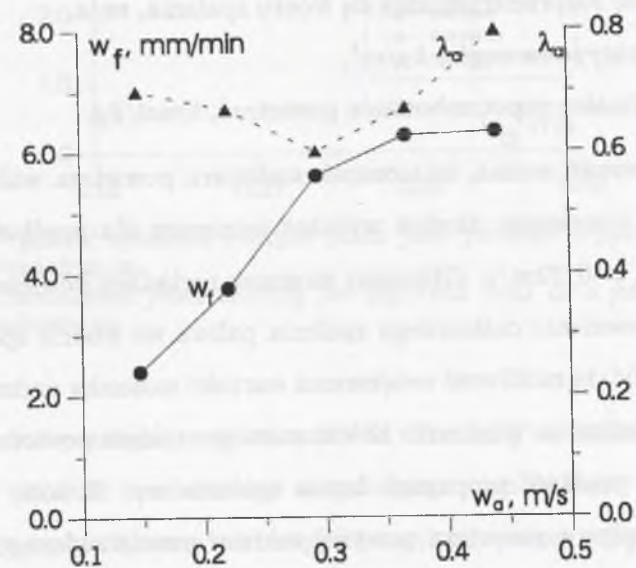
w którym  $\Delta x$  oznacza odległość między punktami pomiaru temperatury, zaś  $\Delta \tau$  oznacza przesunięcie czasowe między przebiegami temperatur rejestrowanych przez poszczególne termopary, którego znaczenie wyjaśnia rys.7.4. Ze względu na występujące w złożu procesy stochastyczne przebieg temperatur rejestrowanych przez termopary nie jest taki gładki jak na rys.7.4, a zatem wartość  $\Delta \tau$  jest nieco inna w zależności od poziomu temperaturowego, na którym się ją wyznacza. Z tego względu zdecydowano się wyznaczyć wartość  $\Delta \tau$  z następującego warunku:

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} ([t_{T1}(\tau) - t_{T2}(\tau + \Delta\tau)]^2 + [t_{T2}(\tau) - t_{T3}(\tau + \Delta\tau)]^2) d\tau \Rightarrow MIN, \quad (7.2)$$

w którym  $t_{T1}$  i  $t_{T2}$  oznaczają odpowiednio temperatury rejestrowane w punktach T1 oraz T2. Graficznie zależność (7.2) interpretować należy jako taką wartość  $\Delta \tau$ , dla którego krzywa  $t_{T1}$  przesunięta w prawo o  $\Delta \tau$  jest najbliższa, w sensie kryterium najmniejszych kwadratów, krzywej  $t_{T2}(\tau)$ , a jednocześnie krzywa  $t_{T2}$  przesunięta w prawo o  $\Delta \tau$  jest najbliższa krzywej  $t_{T3}$ . W przypadku powtarzalnych przebiegów temperatur w poszczególnych punktach złoża, przedstawionych na rys.7.4, granice całkowania  $\tau_1$  oraz  $\tau_2$  można przyjąć praktycznie dowolnie. Ze względu jednak na wspomniane procesy stochastyczne korzystne jest, by przedział całkowania był możliwie szeroki.

W tej pracy za dolną granicę całkowania przyjęto czas  $\tau_1$ , w którym temperatura osiąga wartość  $100^\circ C$ , zaś za górną czas  $\tau_2$ , w którym temperatura przestaje rosnąć.

Wyznaczoną w opisany sposób prędkość spalania jako funkcję ilości dostarczanego powietrza, wyrażonego przez prędkość powietrza w pustym przekroju, obrazuje rys.7.5. Na rysunku tym przedstawiono również stosunek



Rys.7.5. Prędkość propagacji frontu spalania  $w_f$  oraz stosunek nadmiaru powietrza  $\lambda_a$  jako funkcje prędkości napływu powietrza  $w_a$ . Węgiel z KWK "Rozbark"  
Fig.7.5. Flame front propagation velocity  $w_f$  and the air excess ratio  $\lambda_a$  as a function of air velocity. Rozbark coal

nadmiaru powietrza we froncie określony jako strumień powietrza odniesiony do strumienia paliwa obejmowanego przez front spalania pomnożonego przez minimalne zapotrzebowanie powietrza spalania. Tak obliczony stosunek nadmiaru powietrza charakteryzuje jednostkową ilość powietrza biorącą udział w spalaniu w fazie propagacji frontu. Stosunek ten określić można następująco

zależnością:

$$\lambda_a = \frac{\dot{n}_a}{A w \rho n_{amin}}, \quad (7.3)$$

w której oznaczono:

$\dot{n}_a$  - strumień powietrza spalania,  $kmol/s$ ,

$A$  - przekrój poprzeczny złoża,  $m^2$ ,

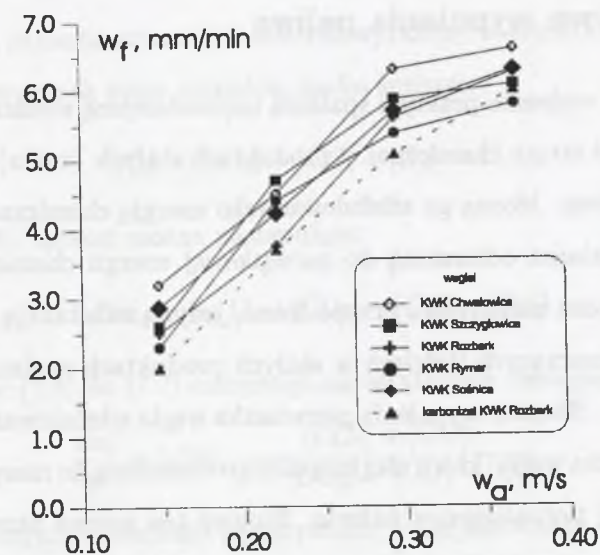
$w_f$  - prędkość rozprzestrzeniania się frontu spalania,  $m/s$ ,

$\rho$  - gęstość nasypowa węgla,  $kg/m^3$ ,

$n_{amin}$  - minimalne zapotrzebowanie powietrza,  $kmol/kg$ .

Zaobserwować można, że stosunek nadmiaru powietrza waha się wokół wartości 0,7 i wykazuje niezbyt wyraźne minimum dla prędkości napływu powietrza  $w_a = 0,22 m/s$ . Obliczony stosunek nadmiaru powietrza jest zbyt niski do zapewnienia całkowitego spalania paliwa we froncie spalania. Należy podkreślić, że możliwość zwiększenia wartości stosunku nadmiaru powietrza jest ograniczona, gdyż wraz ze wzrostem strumienia powietrza  $\dot{n}_a$  rośnie jednocześnie prędkość propagacji frontu spalania  $w_f$ . Z kolei zwiększanie prędkości napływu powietrza powyżej zakresu przedstawionego na rys.7.5 powodowało unoszenie ziaren paliwa. Fakt, że we froncie spalania  $\lambda_a < 1$ , warunkuje występowanie etapu spalania objętościowego zachodzącego po fazie propagacji frontu spalania. Można zatem wnioskować, że dwuetapowy przebieg procesu spalania jest rzeczą charakterystyczną dla spalania współprądowego węgla w warstwie nieruchomej.

Na rys.7.6 przedstawiono szybkość spalania różnych paliw stałych jako funkcję prędkości napływu powietrza  $w_a$ . Zauważyć można, że prędkości spalania węgla różnią się stosunkowo niewiele między sobą. Niewielkie różnice obserwowane między węglami wynikają z ich zbliżonego składu chemicznego oraz właściwości. Na rys.7.6 można również zauważyć, że nie występuje



Rys.7.6. Prędkość spalania różnych paliw jako funkcja prędkości napływu powietrza  $w_a$

Fig.7.6. Combustion front velocity for different fuels as a function of air velocity  $w_a$

istotna różnica pomiędzy węglami z KWK "Rozbark" a karbonizatem powstałym w procesie beztlenowego odgazowania tego paliwa. Świadczy to o niewielkim wpływie zawartości części lotnych na proces propagacji frontu spalania. Jest to spostrzeżenie dość zaskakujące, które może być wytłumaczone tym, że części lotne uwalniają się do fazy gazowej we froncie spalania, jednak całkowitemu lub częściowemu spalaniu ulegają nieco dalej, w obszarze wysokich temperatur. W rezultacie efekt energetyczny ich spalania nie zmienia warunków panujących we froncie, które decydują o prędkości spalania. Oczywiście nie oznacza to, że zawartość części lotnych jest nieistotnym parametrem paliwa, gdyż od ich zawartości zależy przebieg zapłonu paliwa w początkowej fazie całego procesu spalania. W istocie podczas badań prędkości spalania karbonizatu węgla z KWK "Rozbark" występowały poważne problemy z jego zapłonem.

### 7.3. Krzywa wypalania paliwa

Z punktu widzenia praktyki spalania najistotniejszą wielkością, decydującą o wartości straty chemicznej w produktach stałych (żużlu), jest stopień wypalania paliwa. Można go zdefiniować jako energię chemiczną wyzwoloną w procesie spalania odniesioną do początkowej energii chemicznej paliwa. W praktyce, poza nielicznymi przypadkami, jedyną substancją palną, która występuje w znaczących ilościach w stałych produktach spalania, jest pierwiastek węgiel. Stopień wypalania pierwiastka węgla zdefiniować można jako masę pierwiastka węgla, która uległa spaleniu odniesioną do masy pierwiastka węgla zawartej początkowo w paliwie. Stopień ten można określić na podstawie bilansu pierwiastka węgla oraz azotu. Zakładając, że w spalinach jedynymi związkami zawierającymi istotne ilości pierwiastka węgla jest dwutlenek węgla oraz tlenek węgla, zapisać można następujące równanie bilansu pierwiastka węgla:

$$\frac{dn_c}{d\tau} = \dot{n}_{ss} ([CO_2] + [CO]) , \quad (7.4)$$

w którym:

$\frac{dn_c}{d\tau}$  - szybkość ubytku pierwiastka węgla,  $kmol/s$ ,

$\dot{n}_{ss}$  - strumień spalin suchych,  $kmol/s$ ,

[i] - stężenie i-tego składnika w spalinach suchych, %.

Zakładając z kolei, że ilość azotu zawartego w paliwie jest znikoma w porównaniu z ilością azotu dostarczanego w powietrzu spalania oraz że jedynym związkiem, w którym w istotnych ilościach występuje azot w spalinach, jest azot cząsteczkowy, zapisać można następujące równanie bilansu azotu:

$$0.79\dot{n}_a = \dot{n}_{ss}[N_2] , \quad (7.5)$$

przy czym  $\dot{n}_a$  oznacza strumień powietrza wyrażony w  $kmol/s$ . Wykorzystując ponadto warunek sumy udziałów spalin suchych

$$[N_2] + [CO_2] + [CO] + [O_2] = 1 , \quad (7.6)$$

równanie (7.5) zapisać można następująco:

$$0.79\dot{n}_a = \dot{n}_{ss} (1 - [CO_2] - [CO] - [O_2]) \quad (7.7)$$

Podstawiając (7.4) do (7.7) otrzymuje się ostatecznie następujące równanie:

$$\frac{dn_c}{d\tau} = 0.79\dot{n}_a \frac{[CO_2] + [CO]}{1 - [CO_2] - [CO] - [O_2]} , \quad (7.8)$$

w którym wszystkie wielkości są oczywiście funkcjami czasu. Całkując równanie (7.8) od początku procesu spalania do danej chwili  $\tau$ , otrzymuje się ilość pierwiastka węgla, który uległ spaleniu w tym czasie:

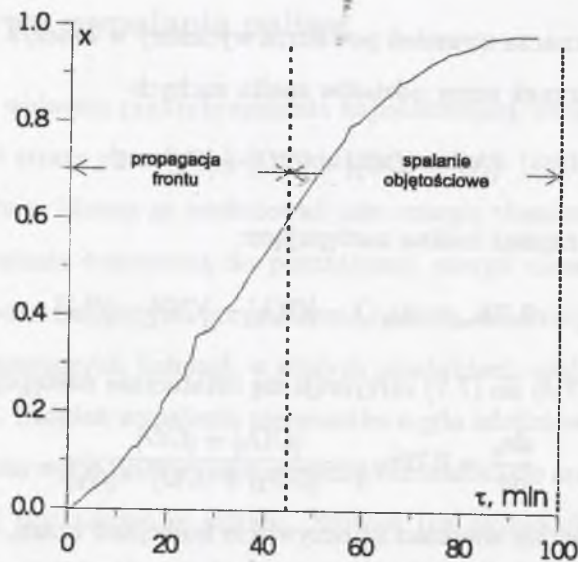
$$n_{c,\tau} = 0.79 \int_0^\tau \dot{n}_a \frac{[CO_2] + [CO]}{1 - [CO_2] - [CO] - [O_2]} d\tau \quad (7.9)$$

Zdefiniowany uprzednio stopień wypalania pierwiastka węgla otrzymuje się ostatecznie dzieląc równanie (7.9) przez ilość węgla znajdującego się początkowo w próbce  $n_{c,t}$ , która jest znana na podstawie analizy elementarnej węgla:

$$x(\tau) = \frac{n_{c,\tau}}{n_{c,t}} \quad (7.10)$$

Zależność  $x(\tau)$  wyznaczoną dla badanego paliwa przy prędkości napływu powietrza  $w_a = 0,22m/s$  przedstawia rys.7.7. Można zauważyć, że początkowo zależność  $x(\tau)$  jest liniowa, co odpowiada fazie propagacji frontu spalania, natomiast później przybiera kształt krzywej asymptotycznej. Końcowa różnica  $1 - x(\infty)$  charakteryzuje tę część pierwiastka węgla, która pozostała w żużlu po zakończeniu procesu spalania.

Funkcja  $x(\tau)$  ma duże znaczenie praktyczne, gdyż pozwala określić ilość pierwiastka, który nie uległ spaleniu w funkcji czasu spalania. Czas spalania

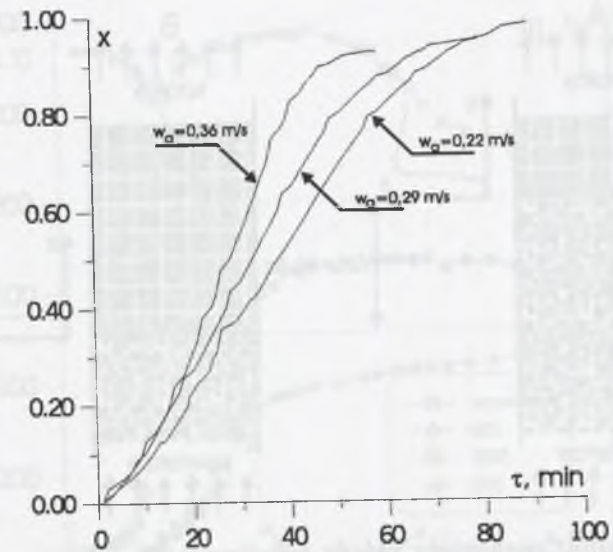


Rys.7.7. Stopień wypalenia pierwiastka węgla jako funkcja czasu spalania. Węgiel z KWK "Rozbark", prędkość napływu powietrza  $w_a = 0,22\text{m/s}$

Fig.7.7. Carbon burn-out fraction as a function of time. Rozbark coal, air velocity  $w_a = 0,22\text{m/s}$

w kotle rusztowym może być wyznaczony na podstawie znajomości długości rusztu oraz prędkości jego przemieszczania się w kotle. W dalszej części pracy przedstawiono bardziej szczegółowo sposób wykorzystania wprowadzonego stopnia wypalenia paliwa w praktyce techniki spalania.

Kształt krzywej wypalania paliwa zależy oczywiście od prędkości napływu powietrza. Na rys.7.8 przedstawiono krzywe wypalania dla prędkości napływu powietrza  $w_a = 0,22\text{m/s}$ ,  $w_a = 0,29\text{m/s}$  oraz  $w_a = 0,36\text{m/s}$ . Wraz ze wzrostem prędkości napływu powietrza zwiększa się nachylenie liniowej części krzywej wypalania. Świadczy to o szybszym wypalaniu pierwiastka węgla. Jednocześnie jednak maleje końcowy stopień wypalenia, co prowadzi do zwiększonej straty chemicznej w stałych produktach spalania. Spadek końcowego stopnia wypalenia wynika z chłodzącego działania strugi



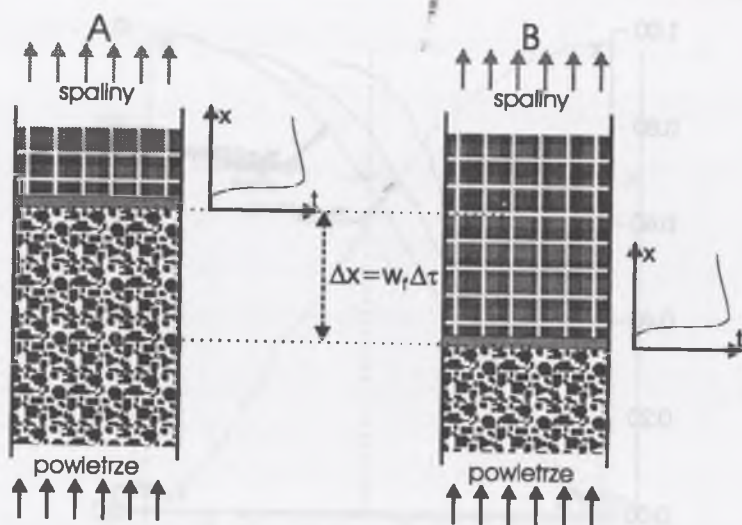
Rys.7.8. Stopień wypalenia pierwiastka węgla jako funkcja czasu spalania dla różnych prędkości napływu powietrza spalania. Węgiel z KWK "Rozbark"

Fig.7.8. Carbon burn-out fraction as a function of time for different air velocities. Rozbark coal

powietrza na złożu. W miarę zmniejszania się zawartości pierwiastka węgla intensywność reakcji heterogenicznych maleje. W pewnym momencie strumień ciepła potrzebnego do podgrzania powietrza przewyższa strumień ciepła wydzielającego się wskutek reakcji, w wyniku czego następuje szybkie wychładzanie złoża.

#### 7.4. Struktura obszaru spalania

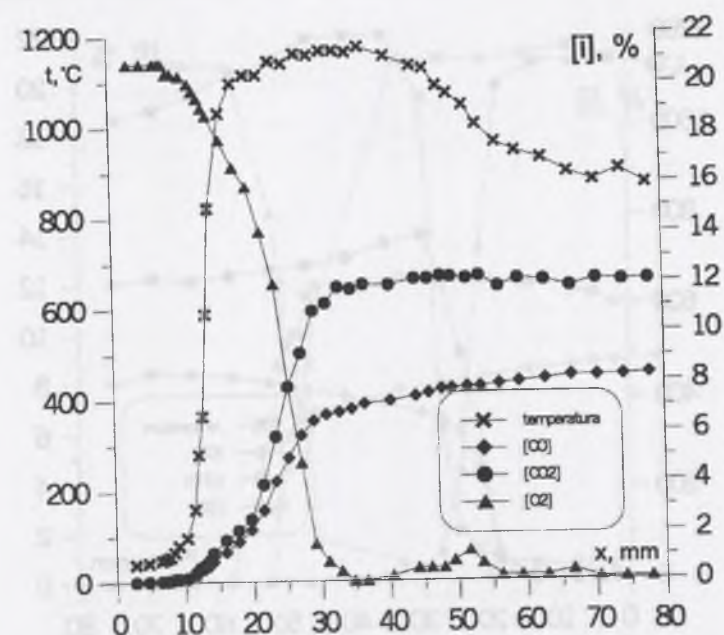
Zbudowane stanowisko pomiarowe umożliwia pomiar składu i temperatur w złożu jako funkcji czasu trwania procesu. Zakładając jednak, że prędkość propagacji frontu spalania jest stała, stosunkowo łatwo określić można przebieg tych zmian w funkcji wymiaru liniowego. Jeżeli bowiem w chwili  $\tau$  temperatura mierzona w danym punkcie wynosi  $t$ , to przy stałej prędko-



Rys.7.9. Schemat ruchomego układu współrzędnych związanego z frontem spalania

Fig.7.9. Scheme of the moving coordinates system

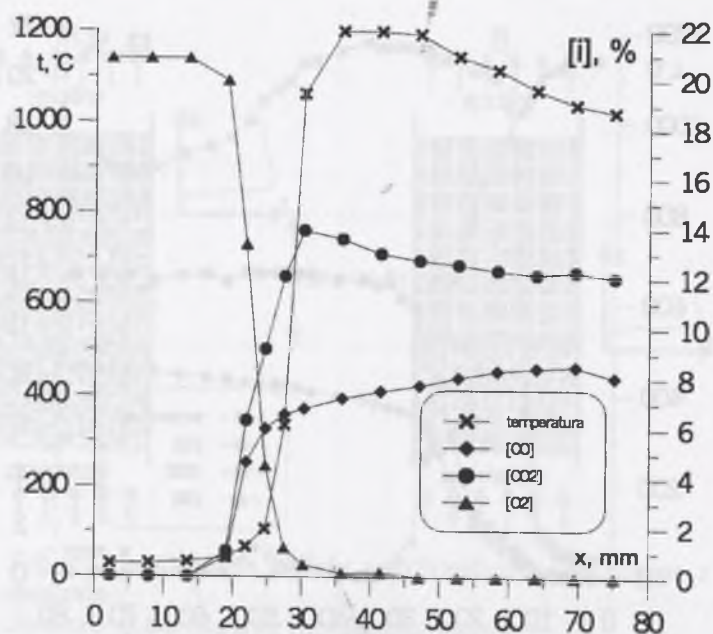
ści propagacji frontu spalania ta sama temperatura występować musiała w chwili  $\tau = 0$  w odległości  $x = w\tau$ . Wykorzystując to rozumowanie można transformacji układu współrzędnych tak, by zmiany parametrów były funkcją odległości a nie czasu. Innymi słowy operacja taka przenosi wyniki pomiarów do ruchomego układu współrzędnych, związanego z przemieszczającym się frontem spalania. Układ ten przedstawiony jest na rys.7.9. Wyniki pomiarów w takim ruchomym układzie współrzędnych przedstawione są na rys.7.10. Krzywe na tym rysunku interpretować można także jako obraz zmian temperatur i składu gazu w nieruchomym układzie współrzędnych w przypadku, w którym paliwo przemieszcza się ku górze z prędkością równą prędkości rozprzestrzeniania się frontu spalania, w rezultacie czego front ten jest nieruchomy względem zewnętrznego układu odniesienia. Taki sposób przedstawienia wyników pomiarów został w pracy wykorzystany między innymi dla potrzeb weryfikacji opracowanego modelu matematycznego.



Rys.7.10. Temperatura oraz skład gazu w obszarze spalania jako funkcja wymiaru liniowego. Węgiel z KWK "Rozbark", prędkość napływu powietrza  $w_a = 0,22\text{m/s}$

Fig.7.10. Temperature and gas composition in combustion zone as a function of distance. Rozbark coal, air velocity  $w_a = 0,22\text{m/s}$

Rysunki 7.11 oraz 7.12 obrazują analogicznie wyznaczone struktury obszaru spalania dla prędkości napływu powietrza odpowiednio  $w_a = 0,29\text{m/s}$  oraz  $w_a = 0,36\text{m/s}$ . Zmiany składu gazu oraz temperatury fazy gazowej wykazują we wszystkich przedstawionych przypadkach podobny charakter. We froncie spalania następuje szybki przyrost temperatury fazy stałej, któremu towarzyszy wzrost udziału  $\text{CO}_2$  oraz  $\text{CO}$  przy spadku udziału  $\text{O}_2$ . Po spadku udziału tlenu do zera zmiany składu gazu są zdecydowanie wolniejsze, choć zauważyć można niewielki spadek udziału  $\text{CO}_2$ , któremu towarzyszy nieco wyraźniejszy wzrost udziału  $\text{CO}$ . Świadczy to o powolnym zachodzeniu reakcji zgazowania za czołem frontu spalania. Temperatura fazy stałej za frontem spalania wyraźnie spada, przy czym spadek ten jest tym mniej wyraźny, im

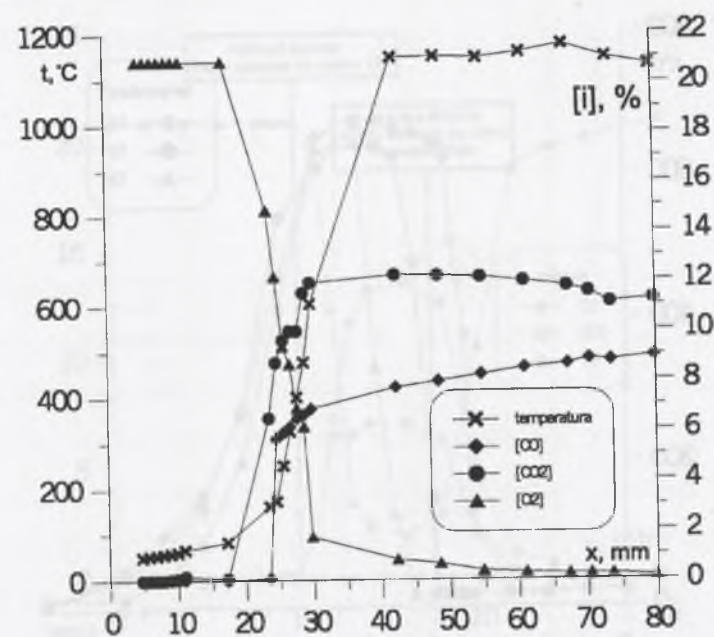


Rys.7.11. Temperatura oraz skład gazu w obszarze spalania jako funkcja wymiaru liniowego. Węgiel z KWK "Rozbark", prędkość napływu powietrza  $w_a = 0,29 \text{ m/s}$

Fig.7.11. Temperature and gas composition in combustion zone as a function of distance. Rozbark coal, air velocity  $w_a = 0,29 \text{ m/s}$

wyższa jest prędkość napływu powietrza. Zdaniem autora za spadek temperatury odpowiedzialna jest niedoskonała izolacja cieplna komory. Im wyższa jest prędkość napływu powietrza, tym większy jest strumień gazów płynący przez złożę, a tym samym tym mniejsza jest rola strat ciepła, które są mniej więcej stałe co do wartości bezwzględnej.

Jak już wspomniano, przebiegi zmian parametrów przedstawione na rys. 7.10, 7.11 oraz 7.12 interpretować można jako obraz obszaru spalania w układzie współrzędnych związanym z frontem spalania. Jednocześnie jednak rysunki te, w przypadku gdy paliwo przemieszcza się współprądowo do kierunku przepływu powietrza, przedstawiają strukturę obszaru spalania w nieruchomym układzie współrzędnych.



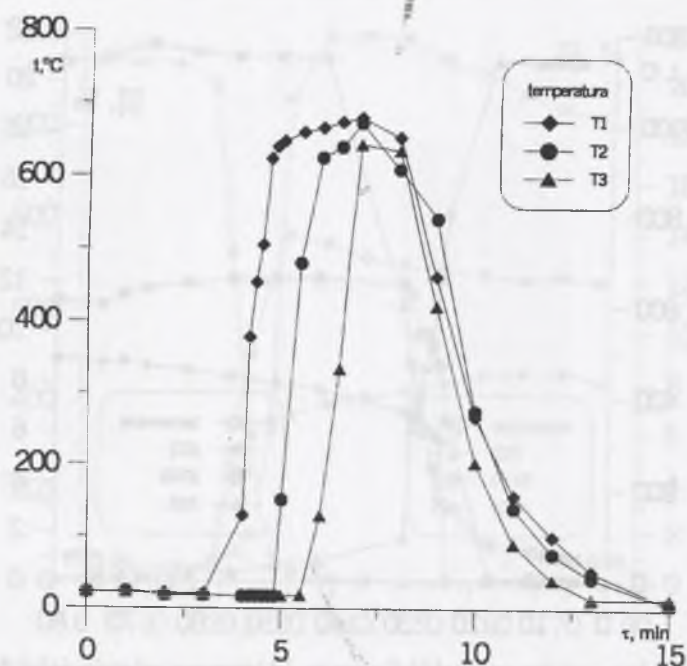
Rys.7.12. Temperatura oraz skład gazu w obszarze spalania jako funkcja wymiaru liniowego. Węgiel z KWK "Rozbark", prędkość napływu powietrza  $w_a = 0,36 \text{ m/s}$

Fig.7.12. Temperature and gas composition in combustion zone as a function of distance. Rozbark coal, air velocity  $w_a = 0,36 \text{ m/s}$

## 7.5. Proces spalania wiórów drzewnych

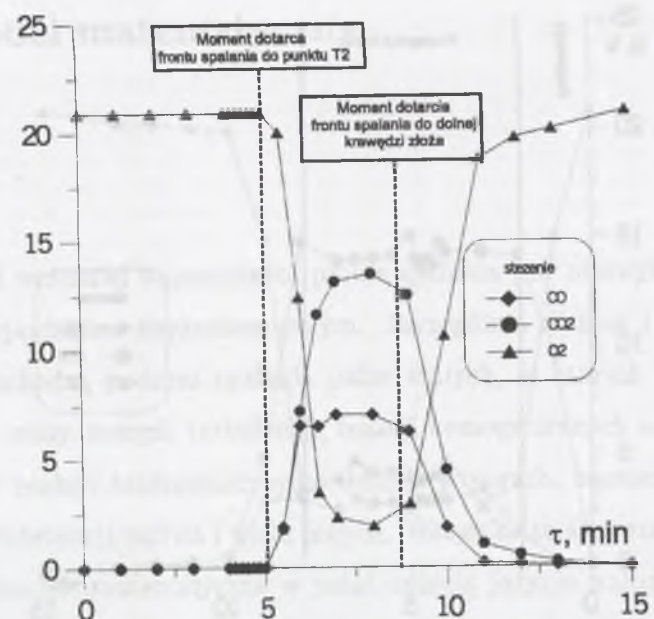
Opracowaną metodykę eksperymentalną zastosowano do badania procesu spalania luźno usypanych wiórów drewna świerkowego. Rysunek 7.13 przedstawia przebieg zmian temperatur w złożu jako funkcję czasu spalania. Zauważyć można pewne podobieństwo, ale jednocześnie zasadnicze różnice w stosunku do spalania węgla. Podobnie jak w przypadku spalania węgla obserwuje się rozprzestrzenianie frontu spalania, który po około 4 minutach od początku trwania procesu dociera do termopary T1, a następnie w odstępach około 1 minuty do termopar T2 oraz T3. Po upływie kolejnej minuty obserwuje się szybkie obniżanie temperatur we wszystkich trzech punktach pomiarowych. Oznacza to, że spalanie wiórów drzewnych odbywa się jed-





Rys.7.13. Temperatury w trzech punktach złoża jako funkcje czasu. Wióry drzewne, prędkość napływu powietrza  $w_a = 0,22\text{m/s}$   
 Fig.7.13. Temperatures at three locations as a functions of time. Wood-chips, air velocity  $w_a = 0,22\text{m/s}$

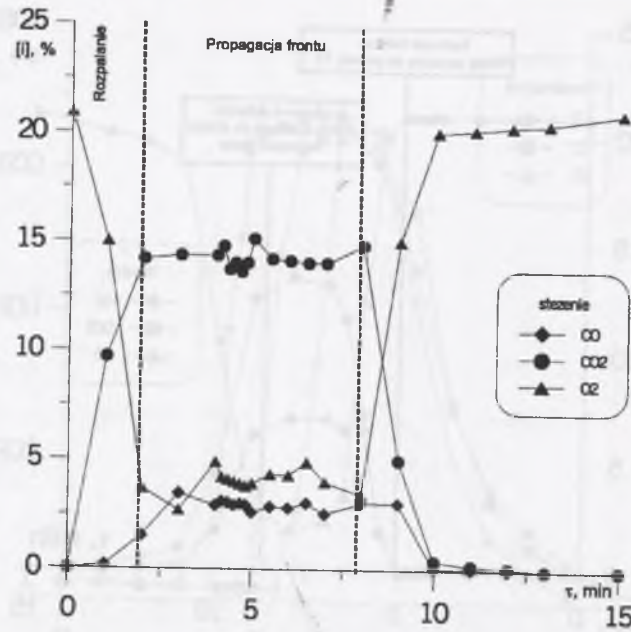
noetapowo. Faza spalania objętościowego zaobserwowana podczas spalania węgla nie występuje. Wniosek taki potwierdzają pomiary składu gazu na wysokości termopary T2, przedstawione na rys.7.14. Zaobserwować można, że od chwili dotarcia frontu spalania do termopary T2 stężenie tlenu szybko maleje, przy jednoczesnym wzroście udziału  $CO$  oraz  $CO_2$ . Istotną różnicą jest jednak to, że udział tlenu nie spada do zera, lecz stabilizuje się na poziomie kilku procent. Również na wylocie z komory spalania udział tlenu jest większy od zera, co obrazuje rys.7.15. Bardzo wyraźnie widoczna jest na nim faza propagacji frontu spalania, charakteryzująca się prawie stałym składem spalin. Zaobserwować można, że udział tlenu w spalinach opuszczających komorę jest nieco mniejszy niż bezpośrednio za frontem spa-



Rys.7.14. Skład gazu w środku złoża jako funkcja czasu. Wióry drzewne, prędkość napływu powietrza  $w_a = 0,22\text{m/s}$   
 Fig.7.14. Gas composition in the middle of the bed as a function of time. Wood-chips, air velocity  $w_a = 0,22\text{m/s}$

lania. Wynika to z dopalania tlenu węgla zachodzącego za frontem. Z uwagi na stosunkowo niską temperaturę dopalanie to zachodzi względnie powoli.

Podsumowując dane przedstawione na rys.7.13 do 7.15 stwierdzić można, że spalaniu wiórów drzewnych towarzyszy, podobnie jak w przypadku węgla, powstanie frontu spalania. Front ten rozprzestrzenia się w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu powietrza. Cała substancja palna paliwa ulega spalaniu we froncie spalania, a w efekcie nie występuje druga faza spalania objętościowego. Stosunek nadmiaru powietrza obliczony według równania (7.3) dla frontu spalania jest większy niż jeden w całym zakresie badanych prędkości napływu powietrza. Ma to ścisły związek z brakiem występowania drugiej fazy spalania. Jakkolwiek spalane wióry drzewne charakteryzowały się około 10-krotnie większą prędkością spalania, to jednocześnie miały zde-



Rys.7.15. Skład gazu opuszczającego komorę spalania. Wióry drzewne, prędkość napływu powietrza  $w_a = 0,22\text{m/s}$

Fig.7.15. Gas composition at the exit of the furnace. Wood-chips, air velocity  $w_a = 0,22\text{m/s}$

cydowanie mniejszą gęstość nasypową w porównaniu z węglem. W efekcie stosunek nadmiaru powietrza we froncie spalania był wyższy od jedności.

## 8. Model matematyczny

Jak już wcześniej wspomniano, proces spalania jest niezwykle skomplikowanym zjawiskiem fizykochemicznym. Szczególnie złożone i różnorodne zjawiska zachodzą podczas spalania paliw stałych, w których zagadnienia transportu masy, energii, turbulencji, reakcji homogenicznych nakładają się na procesy reakcji heterogenicznych, dyfuzji w porach, topnienia popiołu, przemian substancji paliwa i wielu innych. Wszystko to sprawia, że obecnie tworzone modele matematyczne w pełni opisują jedynie najprostsze przypadki spalania, takie jak na przykład laminarne spalanie jednorodnych mieszanek gazowych. Analiza bardziej złożonych przypadków wymaga przyjęcia szeregu założeń upraszczających, co w efekcie prowadzi do niepełnego opisu rzeczywistości przez matematyczne modele spalania. Niemniej jednak modelowanie matematyczne wnosi bardzo wiele do procesu poznania i zrozumienia spalania. Nawet bardzo uproszczone modele pozwalają na uchwycenie tendencji i kierunków zmian, co pozwala na uniknięcie wielu kosztownych i trudnych badań eksperymentalnych. Szczególnie użytecznym działem modelowania matematycznego jest analiza wrażliwości, która umożliwia zbadanie wzajemnego wpływu jednych parametrów spalania na inne oraz wpływu stałych materiałowych na parametry spalania. Badania takie są praktycznie niemożliwe do przeprowadzenia metodą eksperymentalną.

Z powyższych względów w niniejszej pracy, zdając sobie sprawę z ograniczeń modelowania matematycznego, przedstawiono opis matematyczny spalania paliw stałych w warstwie nieruchomej, spodziewając się w efekcie pełniejszego wyjaśnienia zjawisk zachodzących w złożu.

### 8.1. Założenia i ogólny opis modelu

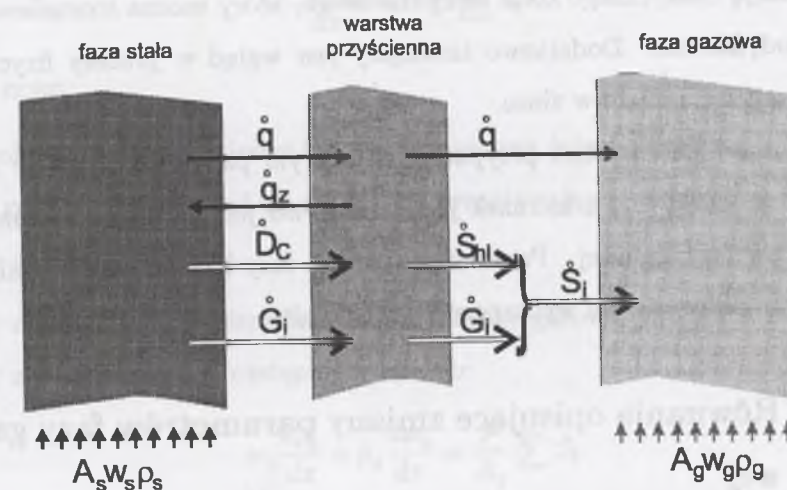
Ze względu na stopień skomplikowania zjawiska modele matematyczne spalania, a szczególnie spalania paliw stałych, opierać się muszą na wielu założeniach upraszczających, z których każde ogranicza zakres, w którym model opisuje rzeczywistość. W ramach niniejszej pracy przyjęto następujące założenia upraszczające:

1. Rzeczywistą geometrię zastąpiono złożem kanałowym, w którym w molenolitycznej, jednorodnej bryle paliwa znajdują się kanały o przekroju kołowym. Liczba i średnica kanałów dobrana jest tak, by zachować cechy charakterystyczne złoża rzeczywistego takie jak na przykład obwód zwilżany oraz porowatość. Wewnątrz kanałów przepływa gaz.
2. Przyjmuje się, że złożo jest jednowymiarowe, a wszystkie jego parametry są funkcją odległości od dolnej jego krawędzi, przy czym temperatura gazu może być różna od temperatury fazy stałej.
3. Przepływ gazu jest wymuszony, a zmiany ciśnienia w złożu mogą być pominięte, w rezultacie czego złożo jest izobaryczne.
4. Przyjmuje się, że w fazie gazowej nie występują żadne substancje stałe i ciekłe, takie jak sadza czy smoły.
5. Znana jest kinetyka odgazowania paliwa.
6. Znane są niezbędne stałe materiałowe fazy stałej i gazowej.

Na przedstawionych założeniach oparto równania matematyczne opisujące proces spalania w złożu. W celu stworzenia możliwie elastycznego modelu, a później kodu komputerowego, zdecydowano się sformułować odrębne równania różniczkowe dla fazy gazowej oraz stałej. Przyjęto, że fazy te oddziałują wzajemnie na siebie poprzez wymianę masy (w wyniku procesów odgazowania oraz zgazowania) oraz energii. Podejście takie sprawiło, że wy-

nikowy kod komputerowy składał się z trzech podstawowych podprogramów, z których jeden obliczał zmiany parametrów fazy gazowej, drugi - fazy stałej, natomiast trzeci definiował strumienie międzyfazowe. Analizowano stan ustalony, w którym prędkość przepływu paliwa jest równa prędkości przemieszczania się frontu spalania, w efekcie czego front spalania pozostaje nieruchomy względem zewnętrznego układu współrzędnych.

Schemat osłon bilansowych oraz wzajemnych oddziaływań pomiędzy nimi przedstawiony jest na rys.8.1. Przyjęto, że wyodrębniona na rysunku warstwa



Rys.8.1. Osłony bilansowe oraz ich wzajemne oddziaływanie  
Fig.8.1. Control volumes and their interactions

przyścienna ma pomijalnie małą objętość, zatem całkowity strumień netto zarówno energii, jak i substancji są zerowe. Warstwa ta jest jedynie osłoną pomocniczą, ułatwiającą sformułowanie równań zachowania dla fazy stałej i gazowej. Paliwo nagrzewając się wydziela części lotne, których strumień ma gęstość  $\dot{G}_i$ . Jednocześnie na powierzchni paliwa zachodzą reakcje heterogeniczne, wywołujące zgazowanie karbonizatu, charakteryzowane przez strumień o gęstości  $\dot{D}_C$ . Różnice stężeń między warstwą przyścienną a fazą

gazową są siłą napędową przepływu substancji na drodze dyfuzji  $\dot{S}_{hi}$ . Po między fazą stałą a gazową występuje przepływ ciepła na drodze konwekcji, a jego gęstość wynosi  $\dot{q}$ . W warstwie przyściennej zachodzą reakcje heterogeniczne, którym towarzyszy efekt cieplny. Przyjęto, że całe ciepło wyzwalone lub pochłaniane w wyniku zachodzenia tych reakcji  $\dot{q}_z$  wymieniane jest z fazą stałą.

Pomimo że na pierwszy rzut oka taki sposób sformułowania modelu wydaje się skomplikowany, to zdaniem autora jest dość przejrzysty i umożliwia konstrukcję elastycznego kodu komputerowego, który można stosunkowo łatwo modyfikować. Dodatkowo łatwiejszy jest wgląd w procesy fizyczne i chemiczne zachodzące w złożu.

W pracy analizowano przypadek, w którym paliwo dopływa ze stałą prędkością  $w_s = w_f$ , a kierunek jego przepływu jest zgodny z kierunkiem przepływu fazy gazowej. Parametry zarówno fazy gazowej, jak i stałej są funkcjami odległości od wybranego punktu złoża.

## 8.2. Równania opisujące zmiany parametrów fazy gazowej

Parametry fazy gazowej zmieniają się na skutek wymiany masy i energii z fazą stałą oraz w wyniku reakcji homogenicznych i dyfuzji w masie gazu. Dla fazy gazowej można zapisać kilka równań bilansowych, z których da się wyznaczyć skład oraz temperaturę fazy gazowej jako funkcję wysokości. Dalej opisano równania wykorzystane w ramach niniejszej pracy.

**Strumień masy całkowitej gazu.** Masa całkowita płynąca przez wszystkie kanały złoża określona jest wyrażeniem:

$$A_g w_g \rho_g, \quad (8.1)$$

w którym:

$A_g$  - sumaryczna powierzchnia przekroju poprzecznego kanałów gazowych,  $m^2$ ,  
 $w_g$  - prędkość przepływu gazu,  $m/s$ ,  
 $\rho_g$  - gęstość gazu,  $kg/m^3$ .

Strumień masy określony wyrażeniem (8.1) zmienia się wskutek napływu substancji od fazy stałej, co można zapisać jako:

$$\frac{d(A_g w_g \rho_g)}{dx} = F \sum \dot{S}_i, \quad (8.2)$$

przy czym:

$F$  - obwód kontaktu między fazą stałą a gazową (obwód zwilżany),  $m$ ,  
 $\dot{S}_i$  - gęstość strumienia i-tej substancji przepływającej między fazą stałą a gazową,  $kg/(m^2s)$ .

Przy założeniu, że powierzchnia przekroju fazy gazowej jest stała, równanie (8.2) zapisać można w następujący sposób:

$$w_g \frac{d\rho_g}{dx} + \rho_g \frac{dw_g}{dx} = \frac{F}{A_g} \sum \dot{S}_i \quad (8.3)$$

**Równanie stanu.** Zgodnie z przyjętymi założeniami gazy traktuje się jak półdoskonałe, a zatem podlegające równaniu stanu Clapeyrona, czyli:

$$\rho_g = \frac{p}{T_g \sum g_i R_i}, \quad (8.4)$$

gdzie:

$g_i$  - udział gramowy i-tej substancji w gazie,  
 $R_i$  - indywidualna stała gazowa i-tej substancji,  $J/(kgK)$ ,  
 $T_g$  - temperatura fazy gazowej,  $K$ ,  
 $p$  - ciśnienie,  $Pa$ .

Zrózniczkowanie równania (8.4) względem wysokości złoża, przy wykorzystaniu założenia o izobaryczności procesu ( $\frac{dp}{dx} = 0$ ), prowadzi do następującego równania:

$$\frac{d\rho_g}{dx} = -p \frac{\frac{dT_g}{dx} \sum g_i R_i + T_g \sum R_i \frac{dg_i}{dx}}{(T_g \sum g_i R_i)^2} \quad (8.5)$$

**Bilans masy i-tej substancji.** Zmiany strumienia masy i-tej substancji oraz związane z nimi zmiany składu gazu powodowane są przez reakcje homogeniczne, dyfuzję masy w gazie oraz dopływ tych substancji od fazy stałej. Równanie bilansu i-tej substancji można zatem zapisać następująco:

$$A_g \frac{d(\rho_g w_g g_i)}{dx} + A_g \frac{dj_i}{dx} = A_g \dot{\omega}_i M_i + F \dot{S}_i, \quad (8.6)$$

przy czym:

$j_i$  - gęstość strumienia dyfuzji masy i-tej substancji wzdłuż wysokości złoża,  $kg/(m^2 s)$ ,

$\dot{\omega}_i$  - wydajność źródła i-tej substancji związanego z zachodzeniem reakcji chemicznej,  $kmol/(m^3 s)$ ,

$M_i$  - masa molowa i-tej substancji,  $kg/kmol$ .

Poszczególne składniki równania (8.6) określają kolejno: konwekcyjny strumień substancji, strumień dyfuzyjny, wydajność źródła związanego z zachodzeniem reakcji homogenicznych oraz napływ substancji od fazy stałej do gazowej. Po wykonaniu różniczkowania względem wysokości złoża równanie (8.6) przybiera następującą postać:

$$A_g \rho_g w_g \frac{dg_i}{dx} + g_i A_g \frac{d(\rho_g w_g)}{dx} + A_g \frac{dj_i}{dx} = A_g \dot{\omega}_i M_i + F \dot{S}_i \quad (8.7)$$

Wprowadzając  $A_g$  pod znak różniczki w drugim składniku lewej strony oraz dzieląc równanie przez  $A_g \rho_g w_g$  otrzymuje się równanie opisujące zmiany udziału gramowego i-tej substancji o następującej postaci:

$$\frac{dg_i}{dx} = \frac{\dot{\omega}_i M_i}{w_g \rho_g} + \frac{F \dot{S}_i}{A_g w_g \rho_g} - \frac{1}{w_g \rho_g} \frac{dj_i}{dx} - \frac{g_i}{w_g \rho_g} \left[ \frac{1}{A_g} \frac{d(A_g w_g \rho_g)}{dx} \right] \quad (8.8)$$

Podstawiając za ostatni z członów powyższego równania zależność (8.2) otrzymuje się ostatecznie:

$$\frac{dg_i}{dx} = \frac{\dot{\omega}_i M_i}{w_g \rho_g} + \frac{F \dot{S}_i}{A_g w_g \rho_g} - \frac{1}{w_g \rho_g} \frac{dj_i}{dx} - \frac{g_i}{w_g \rho_g} \left[ \frac{F}{A_g} \sum \dot{S}_i \right] \quad (8.9)$$

Sumując równania (8.9) zapisane dla wszystkich składników otrzymuje się oczywiście równanie zasady zachowania masy.

**Bilans energii fazy gazowej.** Entalpia całkowita (suma fizycznej i chemicznej) zmienia się wskutek napływu od fazy stałej do gazowej strumieni masy i ciepła oraz w wyniku dyfuzji ciepła w masie gazu. Bilans energii można zatem zapisać następująco:

$$\frac{d(\sum A_g w_g \rho_g g_i i_i)}{dx} + A_g \frac{d(\sum j_i i_i)}{dx} + A_g \frac{d\dot{q}_{Fg}}{dx}, \quad (8.10)$$

$$= F \sum \dot{S}_i i_i + F \dot{q}$$

gdzie:

$i_i$  - entalpia całkowita (suma fizycznej i chemicznej) i-tej substancji,  $J/kg$ ,

$\dot{q}_{Fg}$  - gęstość strumienia energii przekazywanej na drodze przewodzenia wzdłuż złoża w fazie gazowej,  $W/m^2$ ,

$\dot{q}$  - gęstość strumienia energii przekazywanej na drodze konwekcji i promieniowania między fazą gazową a stałą,  $W/m^2$ .

Wykonanie operacji różniczkowania w powyższym równaniu daje następujący wynik:

$$\sum g_i i_i \frac{d(A_g w_g \rho_g)}{dx} + A_g w_g \rho_g \sum i_i \frac{dg_i}{dx} + A_g w_g \rho_g \sum g_i \frac{di_i}{dx} + A_g \sum j_i \frac{di_i}{dx} + A_g \sum i_i \frac{dj_i}{dx} + A_g \frac{d\dot{q}_{Fg}}{dx} = F (\sum \dot{S}_i i_i + \dot{q}) \quad (8.11)$$

Uwzględniając bilans masy całkowitej (8.2) oraz fakt, że:

$$\frac{di_i}{dx} = \frac{di_i}{dT_g} \frac{dT_g}{dx} = c_{pg,i} \frac{dT_g}{dx}, \quad (8.12)$$

równanie (8.11) przyjmuje ostatecznie postać:

$$A_g w_g \rho_g \frac{dT_g}{dx} \sum g_i c_{pg,i} + A_g \frac{dT_g}{dx} \sum j_i c_{pg,i} = \quad (8.13)$$

$$F \left( \sum \dot{S}_i i_i + \dot{q} \right) - \sum g_i i_i \left( F \sum \dot{S}_i \right) +$$

$$- A_g w_g \rho_g \sum i_i \frac{dg_i}{dx} - A_g \sum i_i \frac{dj_i}{dx} - A_g \frac{dq_{Fg}}{dx}$$

Z równania (8.13) można wyznaczyć pochodną temperatury fazy gazowej po wysokości złoża.

Przedstawione równania stanowią komplet równań umożliwiających określenie zmian temperatury i składu fazy gazowej wzdłuż wysokości złoża. Z równań postaci (8.9) wyznacza się pochodne udziałów gramowych  $\frac{dg_i}{dx}$ , następnie z równania (8.13) pochodną temperatury fazy gazowej  $\frac{dT_g}{dx}$ . W dalszej kolejności z równania (8.5) wyznacza się pochodną gęstości i ostatecznie z równania (8.3) pochodną prędkości. Wymienione równania stanowią układ równań różniczkowych sztywnych [15], których rozwiązanie wymaga stosowania specjalnych procedur, co niestety znacznie wydłuża czas obliczeń. Dodatkowo w równaniach tych, w członach dyfuzyjnych, występują w sposób niejawni drugie pochodne udziałów gramowych oraz temperatury, co dodatkowo komplikuje rozwiązanie układu.

Autor niniejszej pracy zdecydował się rozwiązać przedstawiony układ metodą iteracyjną, biorąc do obliczeń wartości strumieni dyfuzyjnych obliczonych w poprzednim kroku iteracyjnym. Dokładniejszy opis zastosowanej metody rozwiązywania przedstawiono w dalszej części pracy.

### 8.3. Równania opisujące zmiany parametrów fazy stałej

W stanie ustalonym paliwo dopływa w sposób ciągły do dolnej części złoża i przesuując się ku górze ulega wypaleniu wskutek wymiany substancji oraz energii z fazą gazową. Zmiany składu fazy stałej wynikają ze zjawiska

odgazowania i zgazowania, natomiast zmiany temperatury wynikają z dyfuzji ciepła w fazie stałej, wymiany ciepła z fazą gazową oraz ciepła reakcji zgazowania. Dla fazy stałej zapisać można równania bilansu całości masy, karbonizatu, i-tej części lotnej oraz energii. Poniżej przedstawiono postać poszczególnych równań.

**Bilans masy.** Strumień masy, który obliczony może być jako  $A_s w_s \rho_s$ , zmienia się w wyniku odpływu od fazy stałej do gazowej strumieni masy związanych z odgazowaniem i zgazowaniem, co można ująć równaniem:

$$\frac{d(A_s w_s \rho_s)}{dx} = -F \left( \sum \dot{G}_i + \dot{D}_c \right) , \quad (8.14)$$

w którym:

$A_s$  - powierzchnia przekroju fazy stałej,  $m^2$ ,

$w_s$  - prędkość fazy stałej,  $m/s$ ,

$\rho_s$  - gęstość fazy stałej,  $kg/m^3$ ,

$\dot{G}_i$  - gęstość strumienia odgazowania i-tej substancji,  $kg/(m^2 s)$ ,

$\dot{D}_c$  - gęstość strumienia zgazowywanego pierwiastka węgla,  $kg/(m^2 s)$ .

**Bilans sumy części lotnych.** Jakkolwiek części lotne w rozumieniu związków chemicznych tworzone są w wyniku pirolizy substancji węgla, to dla celów modelowania przyjąć można, że występują one w węglu w postaci związków uwalnianych do fazy gazowej wraz z nagrzewaniem paliwa. W takim przypadku bilans sumy części lotnych zapisać można jako:

$$\frac{d(A_s w_s \rho_s y_v)}{dx} = -F \sum \dot{G}_i , \quad (8.15)$$

przy czym symbolem  $y_v$  oznaczono gramowy udział części lotnych w paliwie. Wykonując w powyższym równaniu różniczkowanie względem wysokości złoża uzyskuje się następujący wynik:

$$A_s w_s \rho_s \frac{dy_v}{dx} + y_v \frac{d(A_s w_s \rho_s)}{dx} = -F \sum \dot{G}_i \quad (8.16)$$

Wykorzystując równanie (8.14) oraz dzieląc wynik przez  $A_s w_s \rho_s$  otrzymuje się równanie zmiany udziału części lotnych:

$$\frac{dy_v}{dx} = -F \frac{\sum \dot{G}_i}{A_s w_s \rho_s} + y_v F \frac{\sum \dot{G}_i + \dot{D}_c}{A_s w_s \rho_s} \quad (8.17)$$

**Bilans i-tej części lotnej.** Zmiana strumienia i-tej części lotnej spowodowana jest zachodzeniem procesu odgazowania, co można opisać następującym równaniem:

$$\frac{d(A_s w_s \rho_s y_v y_i)}{dx} = -F \dot{G}_i, \quad (8.18)$$

gdzie  $y_i$  oznacza gramowy udział i-tej części lotnej w całkowitej ilości części lotnych. Wykonując różniczkowanie w tym równaniu otrzymuje się następujący rezultat:

$$A_s w_s \rho_s y_v \frac{dy_i}{dx} + y_i \frac{d(A_s w_s \rho_s y_v)}{dx} = -F \dot{G}_i \quad (8.19)$$

Wykorzystując równanie (8.15) można równanie (8.19) zapisać w postaci:

$$\frac{dy_i}{dx} = -\frac{F \dot{G}_i}{A_s w_s \rho_s y_v} + y_i \frac{F \sum \dot{G}_i}{A_s w_s \rho_s y_v} \quad (8.20)$$

**Bilans karbonizatu.** W wyniku odgazowania węgla części lotne uwalniają się do fazy gazowej, a w fazie stałej pozostaje mieszanina pierwiastka węgla i popiołu. Pierwiastek węgiel, który pozostaje w fazie stałej po odgazowaniu, nazwany został karbonizatem. Dla potrzeb modelowania można przyjąć, że karbonizat występuje w węglu jako osobna substancja. W takim przypadku bilans jego masy można zapisać następująco:

$$\frac{d(A_s w_s \rho_s y_c)}{dx} = -F \dot{D}_c, \quad (8.21)$$

przy czym  $y_c$  oznacza udział masowy karbonizatu w paliwie. Dokonując analogicznych zabiegów jak w przypadku bilansu sumy części lotnych otrzymuje się następujący rezultat:

$$\frac{dy_c}{dx} = -F \frac{\dot{D}_c}{A_s w_s \rho_s} + y_c F \frac{(\sum \dot{G}_i + \dot{D}_c)}{A_s w_s \rho_s} \quad (8.22)$$

**Bilans energii.** W niniejszej pracy założono, że piroliza części lotnych nie pociąga za sobą efektów energetycznych. W rzeczywistości efekty takie występują, ponieważ jednak są one niewielkie [37], [59], to mogą być pominięte. Założono ponadto, że w fazie stałej części lotne występują w takiej samej postaci, w jakiej są one uwalniane do fazy gazowej. Przy takich założeniach bilans energii może zostać zapisany przy użyciu entalpii fizycznych przy pominięciu entalpii chemicznych. Przy tych założeniach bilans energii fazy stałej przyjmuje następującą postać:

$$A_s \frac{d\dot{q}_{Fs}}{dx} + \frac{d}{dx} (A_s w_s \rho_s c_{ps} T_s) = F(\dot{q} + \dot{q}_z) - F(\sum \dot{G}_i c_{ps,i} T_s + \dot{D}_c c_{pc} T_s), \quad (8.23)$$

przy czym symbolem  $\dot{q}$  oznaczono gęstość strumienia ciepła konwekcyjnego, przekazywanego od fazy gazowej do stałej, zaś  $\dot{q}_z$  - gęstość strumienia ciepła zgazowania. Ciepło zgazowania wynika z efektu energetycznego reakcji heterogenicznych zachodzących na powierzchni fazy stałej. Zgodnie z przyjętym na wstępie założeniem właściwa pojemność cieplna fazy stałej  $c_{ps}$  może być obliczona jako:

$$c_{ps} = \sum y_v y_i c_{ps,i} + y_c c_{pc} + (1 - y_v - y_c) c_{pp}, \quad (8.24)$$

przy czym  $c_{ps,i}$ ,  $c_{pc}$  i  $c_{pp}$  oznaczają kolejno ciepło właściwe i-tej części lotnej, karbonizatu oraz popiołu. Wykonując różniczkowanie w równaniu (8.23) otrzymuje się równanie postaci:

$$A_s \frac{d\dot{q}_{Fs}}{dx} + c_{ps} T_s \frac{d}{dx} (A_s w_s \rho_s) + A_s w_s \rho_s c_{ps} \frac{dT_s}{dx} + A_s w_s \rho_s T_s \frac{dc_{ps}}{dx} = F(\dot{q} + \dot{q}_z) - F(\sum \dot{G}_i c_{ps,i} T_s + \dot{D}_c c_{pc} T_s), \quad (8.25)$$

z którego wyznaczyć można pochodną temperatury fazy stałej względem wysokości złoża.

Podobnie jak w przypadku fazy gazowej, równania opisujące fazę stałą są równaniami drugiego rzędu i do ich rozwiązania zastosowano, analogicznie do przypadku fazy gazowej, procedurę numeryczną iteracyjnego obliczania strumieni dyfuzyjnych.

#### 8.4. Strumienie międzyfazowe

W poprzednich punktach wyprowadzono równania bilansowe fazy gazowej i stałej, opierając się na znajomości dopływających do nich strumieni substancji i energii. W tej części przedstawiono sposób obliczania tych strumieni. Przepływ masy między fazami spowodowany jest zachodzeniem procesu odgazowania części lotnych oraz zgazowania karbonizatu. Z kolei przepływ energii wywołany jest przepływem substancji, ciepłem przekazywanym konwekcyjnie oraz ciepłem związanym z zachodzeniem reakcji heterogenicznych. Poniżej opisano sposób obliczenia strumieni powodowanych przez każde z powyższych zjawisk.

**Strumienie wywoływane przez reakcje heterogeniczne.** Sposób obliczania tych strumieni zaczerpnięto z [4]. Założono, że stężenia substancji w warstwie przyściennej, odmienne od tych, które występują w masie gazu, są siłą napędową reakcji heterogenicznych. Zgodnie z prawami kinetyki chemicznej [7] gęstość strumienia i-tej substancji produkowanego lub zużywanego na powierzchni fazy stałej w wyniku zachodzenia reakcji heterogenicznych może być wyrażona następującym wzorem:

$$\dot{m}_{r,i} = \Delta\nu_{i,k} \sum_{k=1}^r \alpha_k \prod_j C_{k,j}^{\nu_{j,k}} \quad (8.26)$$

w którym:

$r$  - liczba wszystkich rozpatrywanych reakcji heterogenicznych,

$C_{k,j}$  - stężenie j-tej substancji będącej substratem k-tej reakcji,  $kmol/m^3$ ,

$\nu_{j,k}$  - współczynnik stechiometryczny j-tej substancji w k-tej reakcji,

$\Delta\nu_{i,k}$  - różnica współczynników stechiometrycznych i-tej substancji po prawej i lewej stronie w k-tej reakcji,

$\alpha_k$  - współczynnik szybkości reakcji chemicznej.

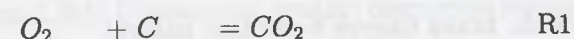
Jednocześnie i-ta substancja przepływa pomiędzy warstwą przyścienną a masą gazu, przy czym gęstość strumienia dyfuzji określona jest następującą zależnością:

$$\dot{m}_{d,i} = \beta(C_i - C_i^0) \quad (8.27)$$

gdzie  $\beta$  oznacza współczynnik wymiany masy [43], natomiast  $C_i^0$  stężenie i-tej substancji w masie gazu. W stanie ustalonym gęstości strumieni określone zależnościami (8.26) oraz (8.27) są sobie równe, a zatem:

$$\Delta\nu_{i,k} \sum_{k=1}^r \alpha_k \prod_j C_{k,j}^{\nu_{j,k}} = \beta(C_i^0 - C_i) \quad (8.28)$$

Równań typu (8.28) jest tyle, ile związków bierze udział w reakcjach heterogenicznych. Tworzą one układ równań nieliniowych. W ramach niniejszej pracy układ ten rozwiązywany był metodą Newtona, przy czym ze względu na braki literaturowe odnośnie stałych szybkości reakcji heterogenicznych, rozważano jedynie cztery reakcje:



Są one wystarczające przy rozpatrywaniu zmian podstawowych związków oraz zmian temperatury. Nie da się jednak na ich podstawie określić wpływu reakcji heterogenicznych na zmianę koncentracji związków o małych stężeniach, takich jak na przykład tlenki azotu.



W efekcie rozwiązania układu równań o postaci (8.28) otrzymywano stężenia w warstwie przyściennej, a następnie wykorzystując równanie (8.26) obliczano gęstości strumieni heterogenicznych  $\dot{S}_{h,i}$ . Suma gęstości strumieni heterogenicznych  $\sum \dot{S}_{h,i}$  równa jest gęstości strumienia zgazowania pierwiastka węgla  $\dot{D}_c$ .

**Odgazowanie paliwa.** Wzorując się na [4], [43] przyjęto, że odgazowanie paliwa opisane jest następującym równaniem:

$$\frac{dg_i}{d\tau} = -k_i g_i, \quad (8.29)$$

w którym  $g_i$  oznacza udział gramowy i-tej części lotnej w paliwie, a  $k_i$  stałą szybkości odgazowania. Początkowa zawartość części lotnych występująca jako stała całkowania równania (8.29) jest przy tym zależna od temperatury procesu. Gęstość strumienia odgazowania  $\dot{G}_i$  wyrażona na jednostkę powierzchni zewnętrznej paliwa wynosi:

$$\dot{G}_i = -\frac{A}{F} \frac{dg_i}{d\tau} \quad (8.30)$$

Jakkolwiek [43] podaje współczynniki szybkości odgazowania  $k_i$  dla różnych substancji wchodzących w skład części lotnych, to w ramach niniejszej pracy przyjęto, że części lotne są jedną substancją. Założenie takie było konieczne z powodu braku danych o pirolizie paliwa.

**Przepływ ciepła na drodze konwekcji.** Ze względu na niewielkie rozmiary kanałów, w których płyną spaliny, i związaną z tym niewielką drogę optyczną, przepływ ciepła na drodze promieniowania między fazą gazową pominięto, przyjmując, że przepływ ciepła odbywa się wyłącznie na drodze konwekcji i opisany jest równaniem:

$$\dot{q} = \alpha(t_g - t_s), \quad (8.31)$$

w którym  $\alpha$  oznacza współczynnik wnikania ciepła,  $t_g$ - temperaturę fazy gazowej, natomiast  $t_s$ - temperaturę fazy stałej. Sposób wyznaczania współczynnika wnikania ciepła w zależności od prędkości przepływu gazu zaczerpnięto z [43].

**Ciepło reakcji heterogenicznych.** Reakcje heterogeniczne zachodzą na powierzchni fazy stałej. Z tego względu założono, że ciepło wyzwalone lub pochłaniane w wyniku ich zachodzenia pobierane jest od fazy stałej. Przyjęto zatem, że temperatura warstwy przyściennej jest równa temperaturze fazy stałej. Ilość ciepła reakcji zachodzących w warstwie przyściennej jest więc równa sumie entalpii wszystkich strumieni substancji napływających i odpływających od tej warstwy.

**Entalpia i strumienie dyfuzji.** Do obliczenia entalpii oraz własności transportowych gazów użyto biblioteki podprogramów wchodzących w skład biblioteki Chemkin. Obliczanie entalpii bazuje na wielomianach interpolacyjnych opracowanych przez NASA [19].

**Wydajność reakcji homogenicznej.** Dla reakcji chemicznej postaci:



w której literami A,B,C,D oznaczono związki chemiczne biorące w niej udział, natomiast symbolem  $\nu$  oznaczono współczynnik stechiometryczny, szybkość zmian koncentracji związku A wyrażona jest zależnością [7]:

$$\frac{dC_A}{d\tau} = \nu_A (k_f C_A^{\nu_A} C_B^{\nu_B} - k_b C_C^{\nu_C} C_D^{\nu_D}) \quad (8.33)$$

Jeżeli dany związek bierze udział w więcej niż jednej reakcji chemicznej, to szybkość zmian jego koncentracji równa jest sumie szybkości obliczonych dla poszczególnych reakcji i oznaczana jako  $\dot{\omega}$ .

## 8.5. Warunki brzegowe

Przedstawiony układ równań różniczkowych opisujących ustalony proces spalania w złożu nieruchomym jest układem drugiego rzędu, a drugie pochodne udziałów gramowych oraz temperatury występują w sposób niejawni w członach opisujących strumienie dyfuzyjne. W konsekwencji do otrzymania jednoznacznego rozwiązania układu potrzebne są dwa warunki brzegowe.

Pierwszy warunek wynika z faktu, że w dostatecznej odległości przed frontem spalania znane są parametry substratów spalania, takie jak skład oraz temperatury, co symbolicznie zapisać można w następujący sposób:

$$x \rightarrow -\infty \quad u \rightarrow u_0, \quad (8.34)$$

przy czym symbol  $u$  oznacza dowolny parametr złoża (temperaturę, skład itp).

W dostatecznie dużej odległości od frontu spalania po stronie zimnej można przyjąć, że gradienty wszystkich wielkości dążą do zera, co można symbolicznie zapisać jako:

$$x \rightarrow -\infty \quad \frac{du}{dx} \rightarrow 0 \quad (8.35)$$

Warunki (8.34) oraz (8.35) są wystarczające do rozwiązania układu równań. Jest jednak jeszcze trzeci warunek, wynikający z faktu, że w dostatecznie dużej odległości od frontu po stronie gorącej gradienty wszystkich parametrów zanikają, co można wyrazić symbolicznie w następujący sposób:

$$x \rightarrow \infty \quad \frac{du}{dx} \rightarrow 0 \quad (8.36)$$

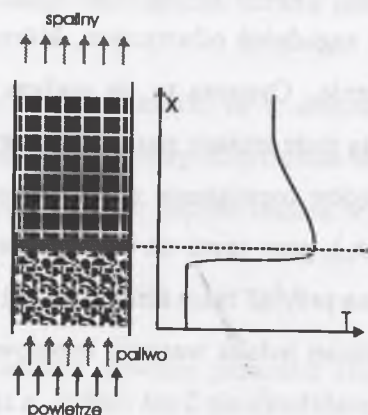
Warunki (8.34), (8.35) oraz (8.36) są identyczne z warunkami podanymi w [4], wprowadzonymi dla potrzeb analizy propagacji frontu spalania w mie-

szance gazowej. Rozwiązanie nietrywialne może spełnić wszystkie trzy warunki brzegowe jedynie przy jednej określonej wartości prędkości przemieszczania się paliwa, przy zadanej prędkości przepływu powietrza, lub przy jednej prędkości powietrza przy zadanej prędkości paliwa. Podobnie jak w przypadku propagacji frontu spalania w mieszance gazowej układ warunków brzegowych implikuje poważne trudności w rozwiązaniu numerycznym. Zadanie bowiem należy do klasy zagadnień odwrotnych, które są ze swej natury źle uwarunkowane numerycznie. Oznacza to, że małym zmianom parametrów wejściowych odpowiadają duże zmiany parametrów wynikowych.

Z oczywistych względów rozwiązanie numeryczne prowadzi się w przedziale skończonym  $(x_1; x_2)$ , przy czym na końcach przedziału, jeżeli jest on dostatecznie długi, można przyjąć takie same warunki brzegowe jak dla przedziału  $(-\infty; +\infty)$ . Niemniej jednak warunki brzegowe nie określają punktu w przedziale, w którym stabilizuje się front reakcji, a zatem może się on stabilizować w zasadzie w dowolnym jego punkcie, dostatecznie odległym od końców przedziału, spełniając przy tym wszystkie warunki brzegowe. Podobne zagadnienie analizowano w pracy [18], poświęconej wyznaczaniu normalnej prędkości spalania paliw gazowych. W pracy tej autorzy zdecydowali się narzucić punkt w przedziale o określonej temperaturze. Wówczas zagadnienie sprowadzało się do znalezienia takiej prędkości gazu, przy której rozwiązanie zawiera ten punkt spełniając jednocześnie warunki brzegowe. Autor niniejszej pracy, wzorując się na tym podejściu, wprowadził punktowe źródło ciepła, które ma za zadanie doprowadzić określony przekrój złoża do zadanej temperatury. Zagadnienie sprowadza się do znalezienia takiej prędkości przepływu paliwa, przy której moc źródła jest zerowa. Dokładniej zagadnienie to będzie dyskutowane w dalszej części pracy.

## 8.6. Sposób rozwiązania

W pracy analizowany jest stan ustalony, w którym szybkość dopływu paliwa  $w_s$ , równa jest prędkości rozprzestrzeniania się frontu spalania  $w_f$ , w efekcie czego front ten jest nieruchomy względem zewnętrznego układu współrzędnych, co ilustruje rys.8.2. Opracowany model matematyczny składa się



Rys.8.2. Schemat analizowanego układu

Fig.8.2. Scheme of the analyzed case

z układu równań różniczkowych opisujących fazę gazową, układu równań różniczkowych opisujących fazę stałą oraz równań definiujących strumienie substancji i energii przepływających między tymi fazami. Istnieje możliwość połączenia wszystkich tych równań w jeden zbiorczy układ. Jednak, zdaniem autora, takie podejście do problemu powodowałoby nieprzejrzystość algorytmu, a w konsekwencji kodu komputerowego, utrudniając jego ewentualne modyfikacje. Z tego względu zdecydowano się rozwiązywać oddzielnie równania fazy gazowej oraz stałej przy zadanych strumieniach przepływów międzyfazowych.

Zarówno faza stała, jak i gazowa opisane są układem równań różniczkowych drugiego rzędu. Do rozwiązania takiego typu układu zastosować można

kilka różnych metod. Rozwiązanie utrudnia fakt, że są to układy równań różniczkowych sztywnych, co jest typową sytuacją dla zagadnień kinetyki chemicznej. W ramach tej pracy zdecydowano się na rozwiązywanie przy zastosowaniu pakietu do rozwiązywania równań różniczkowych zwyczajnych w połączeniu z iteracyjnym obliczaniem strumieni dyfuzyjnych. Dla zadanych strumieni przepływów międzyfazowych zakładano zerowe strumienie dyfuzyjne i rozwiązywano układ zapisując wartości rozwiązań w węzłach podziału numerycznego. Na podstawie zapisanych wartości obliczano strumienie dyfuzyjne, po czym powtarzano rozwiązywanie układu. Procedurę powtarzano do uzyskania niezmienności strumieni dyfuzyjnych w kolejnych krokach iteracyjnych. Taka metoda pozwoliła na zastosowanie bardzo wydajnego pakietu do rozwiązywania równań różniczkowych zwyczajnych sztywnych [15] oraz pozwalała na automatyczne zagęszczanie punktów w miejscach występowania wysokich gradientów. Identyczna procedura stosowana była zarówno w odniesieniu do fazy gazowej, jak i stałej. Po obliczeniu parametrów obu faz dokonywano obliczeń strumieni międzyfazowych, po czym ponownie obliczano parametry fazy gazowej i stałej. Kryterium końca obliczeń była niezmiennosc strumieni międzyfazowych w kolejnych krokach iteracyjnych. Obliczenia prowadzone na komputerze klasy PC o częstotliwości zegara 600 MHz trwały około 2 minut, co jest wartością akceptowalną.

Zastosowana metoda rozwiązania znalazła swoje odzwierciedlenie w budowie kodu komputerowego, w skład którego weszły następujące moduły:

**M1 Podprogram analizy fazy gazowej.** Danymi do tego podprogramu były wartości strumieni międzyfazowych podane dyskretnie. W trakcie obliczeń dokonywano interpolacji wartości strumieni międzyfazowych. Obliczenia w podprogramie prowadzone były iteracyjnie do momentu uzyskania niezmienności strumieni dyfuzyjnych. Wynikami działania

podprogramu były parametry fazy gazowej zapamiętane w punktach, przy czym punkty zagęszczano w obszarze występowania wysokich wartości gradientów.

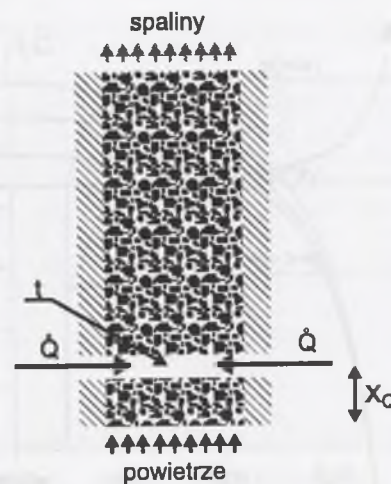
**M2 Podprogram analizy fazy stałej.** Danymi do tego podprogramu były wartości strumieni międzyfazowych podane dyskretnie. Obliczenia w podprogramie prowadzone były iteracyjnie do momentu uzyskania niezmienności strumieni dyfuzyjnych. Wynikami działania podprogramu były parametry fazy stałej zapamiętane w punktach, zagęszczonych w obszarze występowania wysokich wartości gradientów.

**M3 Podprogram obliczania wartości strumieni międzyfazowych.** Danymi dla tego podprogramu były parametry fazy gazowej oraz stałej dane dyskretnie, obliczone przez podprogramy M1 oraz M2.

**M4 Podprogramy definiujące równania różniczkowe fazy gazowej oraz stałej** w formie wymaganej przez solwer układu równań różniczkowych. Podprogramy te wywoływane były z modułów M1 oraz M2 za pośrednictwem solwera równań różniczkowych.

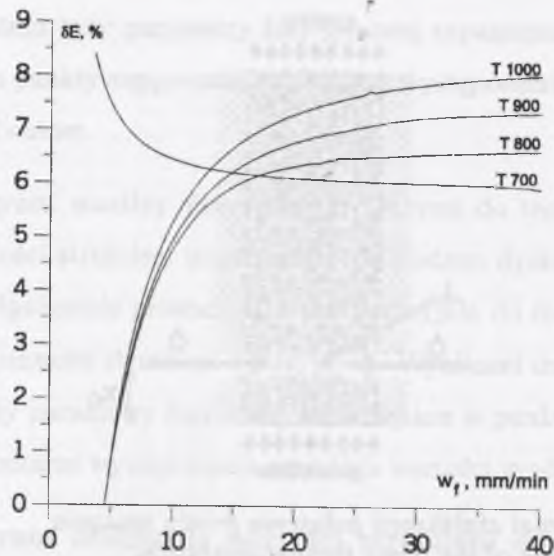
**M5 Program główny.** Program główny obok zadań pomocniczych, takich jak czytanie i wydruk danych, kontrolował zbieżność algorytmu przez analizę wartości strumieni międzyfazowych w kolejnych krokach iteracyjnych. Z modułu tego wywoływane były kolejno podprogramy M3, M2 oraz M1.

Jak wspomniano wcześniej, układ warunków brzegowych nie narzuca miejsca, w którym następuje stabilizacja frontu. Z tego względu zdecydowano się na wprowadzenie wirtualnego źródła ciepła, którego zadaniem było nagrzanie jednego przekroju, położonego w dowolnej odległości  $x_Q$  od spodu złoża, do zadanej temperatury, co przedstawia rys.8.3. Problem sprowadził



Rys.8.3. Schemat stabilizacji położenia frontu spalania  
Fig.8.3. Scheme of the flame front stabilization

się do takiego dobrania początkowej prędkości przemieszczania się paliwa  $w_f$ , przy której moc tego źródła jest zerowa, a pomimo tego temperatura w zadanej płaszczyźnie utrzymuje się na zadanym poziomie. W przypadku zbyt dużej prędkości paliwa front spalania miał tendencje do przemieszczania się ku górze. Odpowiada to procesowi urywania się płomienia. W takim przypadku utrzymanie zadanej temperatury wymagało doprowadzania tym większej mocy cieplnej, im większa była prędkość paliwa. W przypadku za niskiej prędkości front spalania miał tendencje do stabilizowania się poniżej źródła ciepła, a w efekcie źródło ciepła stawało się ujemne. Na rys.8.4 przedstawiono względną moc źródła ciepła, odniesioną do początkowej energii paliwa, jako funkcję prędkości przemieszczania się paliwa dla różnych narzuconych temperatur. Zauważyć można, że niezależnie od narzuconej temperatury  $T = 1000K$ ,  $T = 900K$ ,  $T = 800K$  zerowa moc źródła występuje dla jednakowej prędkości paliwa. Jednak gdy temperatura jest zbyt niska ( $T = 700K$ ), rozwiązanie nie jest osiągalne, a moc źródła zmierza do nie-

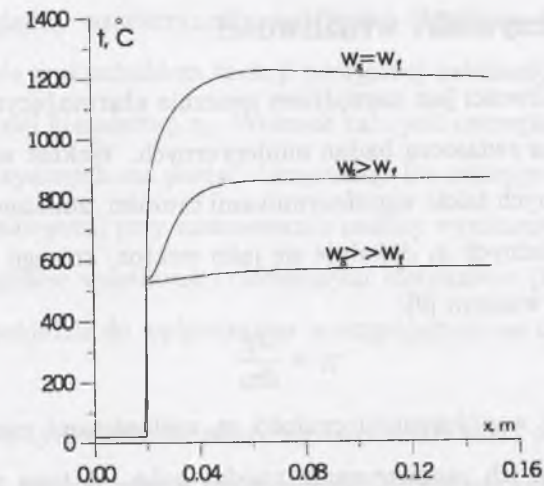


Rys.8.4. Energia dostarczana do złoża odniesiona do początkowej energii paliwa jako funkcja prędkości przemieszczania się fazy stałej przy różnych narzuconych temperaturach fazy stałej w miejscu dopływu energii

Fig.8.4. Relative heat power of the virtual heat source as a function of solid phase velocity at different temperatures of the heat source

skończoności. Można to wytłumaczyć tym, że początkowy strumień energii paliwa zmierza do zera, natomiast strumień energii potrzebnej do utrzymania złoża w zadanej temperaturze jest dodatni ze względu na chłodzące działanie gazu. Temperatura  $T = 700K$  jest zbyt niska, by zainicjować proces spalania. Oczywiście narzucona temperatura nie może być zbyt wysoka, gdyż wtedy niezależnie od prędkości fazy stałej moc źródła musiałaby być większa od zera.

Rysunek 8.5 obrazuje przebiegi temperatur fazy stałej wzdłuż wysokości złoża. Wynika z niego, że przy zbyt dużej prędkości paliwa  $w_s \gg w_f$  w stosunku do prędkości spalania, temperatura gwałtownie rośnie w miejscu występowania źródła, po czym podnosi się bardzo niewiele wskutek reakcji rozwijających się na powierzchni fazy stałej. W przypadku niższej prędkości,



Rys.8.5. Rozkład temperatur w złożu przy różnych prędkościach fazy stałej w stosunku do prędkości spalania

Fig.8.5. Temperatures along bed for different solid phase velocities

ale nadal przewyższającej prędkość spalania  $w_s > w_f$ , obserwuje się podobny charakter zmian, przy czym wzrost temperatury za miejscem występowania źródła jest wyraźniejszy. W przypadku prędkości paliwa równej prędkości spalania  $w_s = w_f$  przebieg temperatury jest gładki bez uskoków.

Badanie niezbędnej mocy źródła ciepła w zależności od prędkości fazy stałej  $\dot{Q}_z = f(w_s)$  pozwala na zastosowanie jednej z metod znajdowania miejsca zerowego funkcji. W tym przypadku wartością funkcji jest moc źródła, a argumentem początkowa prędkość przemieszczania się paliwa. W tej pracy do znalezienia miejsca zerowego funkcji  $\dot{Q} = f(w_s)$  zastosowano metodę bisekcji, przy czym wstępnego oszacowania wartości miejsca zerowego dokonywano metodą kroczenia, począwszy od dużych wartości prędkości paliwa ku mniejszym. Należy tutaj zaznaczyć, że uzyskanie rozwiązania, przy prędkościach znacznie mniejszych od prędkości frontu spalania, było bardzo czasochłonne ze względu na bardzo słabą zbieżność i konieczność stosowania wysokiej podrelaksacji.

## 8.7. Współczynniki wrażliwości

Analiza wrażliwości jest narzędziem znacznie ułatwiającym interpretację wyników badań, a zwłaszcza badań numerycznych. Wektor współczynników wrażliwości, zwanych także współczynnikami czułości, zmiennej zależnej  $y$  od zmiennych niezależnych  $x_i$ , definiuje się jako wektor, którego elementy dane są następującym wzorem [9]:

$$\gamma_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} \quad (8.37)$$

Tak zdefiniowane współczynniki czułości są wielkościami mianowanymi, co znacznie utrudnia ich porównywanie między sobą. Z tego względu często używa się pojęcia bezwymiarowego współczynnika wrażliwości [9]:

$$\gamma_i = \frac{x_i}{y} \frac{\partial y}{\partial x_i}, \quad (8.38)$$

który może być interpretowany jako procentowa zmiana wielkości zależnej  $y$ , powodowana przez zmianę  $i$ -tej wielkości niezależnej o 1%.

W niniejszej pracy autor dążył do przedstawienia zmiennej zależnej  $y$  jako iloczynu zmiennych niezależnych  $x_i$  podniesionych do potęg  $n_i$ :

$$y = A \prod x_i^{n_i} \quad (8.39)$$

Dokonując różniczkowania wyrażenia (8.39) względem zmiennej niezależnej  $x_i$  otrzymuje się następujący rezultat:

$$\frac{\partial y}{\partial x_i} = A n_i \frac{\prod x_i^{n_i}}{x_i} \quad (8.40)$$

Dzieląc stronami równania (8.39) oraz (8.40) otrzymuje się:

$$\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_i} = n_i x_i^{-1}, \quad (8.41)$$

a stąd ostatecznie:

$$\gamma_i = \frac{x_i}{y} \frac{\partial y}{\partial x_i} = n_i \quad (8.42)$$

Zatem względny współczynnik wrażliwości określony równaniem (8.38) jest jednocześnie wykładnikiem funkcji potęgowej zależności zmiennej zależnej  $y$  od zmiennej niezależnej  $x_i$ . Wniosek taki jest szczególnie istotny, gdyż wiele równań fizycznych ma postać iloczynową. Do takiej postaci równań dochodzi się też zazwyczaj przy zastosowaniu analizy wymiarowej. Poprzez analizę współczynników wrażliwości określonych równaniem (8.38) można więc na przykład dochodzić do wykładników występujących we wzorach kryterialnych.

Określone w tym rozdziale współczynniki wrażliwości obliczane były numerycznie przy wykorzystaniu opracowanego programu komputerowego.

## 9. Wyniki badań numerycznych

Opracowany model matematyczny opiera się na szeregu założeń upraszczających, przez co należy przyjąć, że nie obejmuje różnic pomiędzy poszczególnymi węglami. Za przykład trudności w stworzeniu modelu obejmującego wszystkie możliwe rodzaje paliw posłużyć może przytoczona w [4] rozbieżność między danymi uzyskanymi w różnych laboratoriach dla tych samych węgla. W niektórych przypadkach rozbieżność dochodzi do kilku rzędów wielkości. Z tego względu niektóre dane do modelu, takie jak np. obwód zwilżany, zostały dobrane doświadczalnie tak, by rozbieżność między wynikami pomiarów i obliczeń była jak najmniejsza.

Pomimo poczynionych uproszczeń model ujmuje istotę podstawowych zjawisk fizycznych i chemicznych zachodzących w złożu. Można się spodziewać, że tendencje zmian wykazane w modelu będą miały swe przeniesienie na paliwa rzeczywiste.

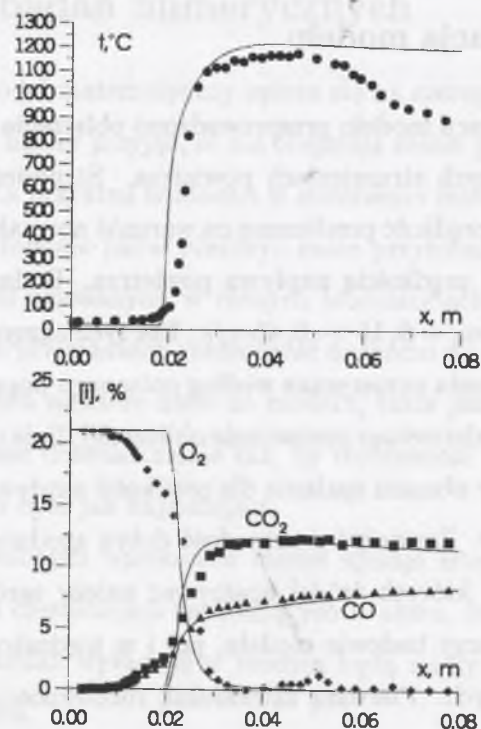
Najistotniejszym efektem stosowania modelu jest możliwość przeprowadzenia analizy wrażliwości, która pozwala na określenie wpływu poszczególnych parametrów procesu spalania oraz paliwa na określone parametry wynikowe. W pracy skoncentrowano się na analizie wpływu wybranych parametrów na wartość prędkości spalania paliwa stałego.

Pomiary przemysłowe przeprowadzono przy wykorzystaniu węgla z KWK "Rozbark". Z tego względu dla potrzeb modelowania przyjęto paliwo o takiej samej zawartości części palnych, karbonizatu oraz popiołu jak wspomniany węgiel.

### 9.1. Weryfikacja modelu

W celu weryfikacji modelu przeprowadzono obliczenia struktury obszaru spalania przy różnych strumieniach powietrza. Strumień powietrza wyrażano poprzez jego prędkość przeliczoną na warunki normalne i pusty przekrój złoża, zwaną dalej prędkością napływu powietrza. Badania prowadzono w zakresie prędkości  $w_a = 0,15 - 0,45 m/s$ . Dla tych samych warunków przeprowadzono obliczenia numeryczne według opisanego poprzednio algorytmu.

Na rys.9.1 przedstawiono porównanie obliczonej (linie ciągłe) i zmierzonej (punkty) struktury obszaru spalania dla prędkości napływu powietrza spalania  $w_a = 0,22 m/s$ . Zauważyć można dość dobrą zgodność. Istnieje jednak kilka rozbieżności, których źródła upatrywać należy zarówno w uproszczeniach przyjętych przy budowie modelu, jak i w niedoskonałości niektórych technik pomiarowych. Pierwszą zauważalną rozbieżnością jest to, że zmierzony skład gazu zaczyna zmieniać się już w większej odległości od frontu spalania niż skład obliczony. Prawdopodobnie wynika to z migracji drobnych ziaren węgla w złożu, które ulegają zapłonowi w strefie spalania, po czym opadają poniżej tego frontu i płonąc zmieniają skład gazu. Wyjaśnienie to jest tym prawdopodobniejsze, że rozbieżność nie występuje przy wyższych prędkościach napływu powietrza spalania, gdyż wtedy opadanie cząstek jest utrudnione przez zwiększoną siłę aerodynamiczną wywieraną przez gaz. Przyczyną obserwowanej rozbieżności może być także niedoskonałość metody pobierania próbek gazu, która z oczywistych względów nie jest pobierana punktowo, lecz z pewnego obszaru wyznaczanego przez średnicę króćca poboru gazu. Efekt ten potęgowany jest ssącym działaniem układu poboru gazu. Najpoważniejsza rozbieżność obserwowana jest jednak w przebiegu temperatury, która w pomiarach obniża się dość znacznie, podczas gdy obliczeniowo wykazuje bardzo niewielką tendencję spadkową. Różnica, zdaniem

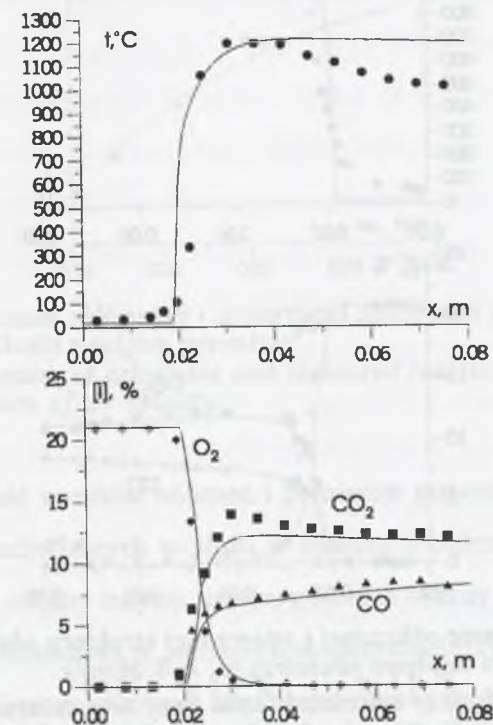


Rys.9.1. Porównanie obliczonej (linia ciągła) i zmierzonej (punkty) struktury obszaru spalania dla prędkości napływu powietrza  $w_a = 0,22\text{m/s}$

Fig.9.1. Comparison of calculated (solid line) and measured (points) combustion zone structure for the air velocity  $w_a = 0,22\text{m/s}$

autora, wynika ze strat ciepła występujących mimo izolacji w złożu rzeczywistym. Ze względu na duże gradienty temperatur występujące we froncie spalania ceramika, mająca za zadanie izolować cieplnie złoże, często pękała przyczyniając się do zwiększenia strat ciepła, co z kolei pociągało obniżenie temperatury w złożu. Gdyby występowały inne przyczyny spadku temperatury, powinny one znaleźć swoje odzwierciedlenie w przebiegu stężeń. Z tego właśnie względu, zdaniem autora, w stratach ciepła występujących w badawczej komorze spalania należy upatrywać przyczyn rozbieżności obliczonej i zmierzonej temperatury w złożu.

Lepsza zgodność wyników pomiarów oraz obliczeń wystąpiła dla prędkości napływu powietrza  $w_a = 0,29\text{m/s}$ , przedstawionych na rys.9.2. Wyniki

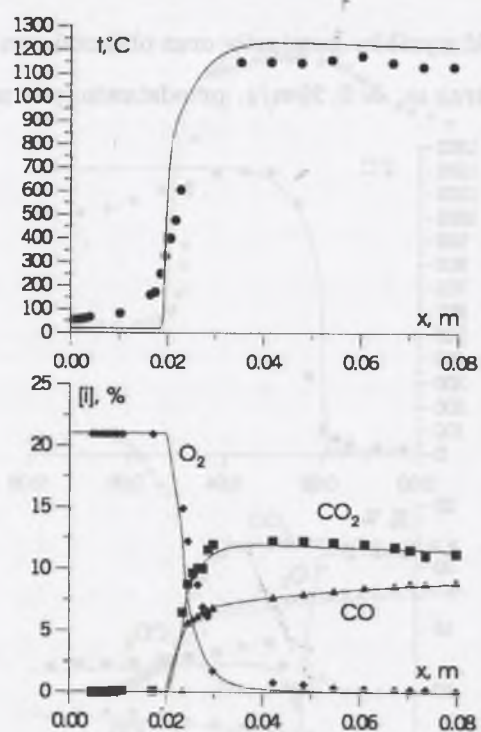


Rys.9.2. Porównanie obliczonej i zmierzonej struktury obszaru spalania dla prędkości napływu powietrza  $w_a = 0,29\text{m/s}$

Fig.9.2. Comparison of calculated (solid line) and measured (points) combustion zone structure for the air velocity  $w_a = 0,29\text{m/s}$

obliczeniowe zachowują wszystkie trendy wykazane w badaniach doświadczalnych, choć z tych samych przyczyn co poprzednio obserwuje się spadek zmierzonej temperatury spalania za frontem spalania. W przypadku prędkości napływu powietrza  $w_a = 0,36\text{m/s}$  przedstawionego na rys.9.3 temperatura zmierzona oraz obliczona pozostają w najlepszej zgodności w strefie za frontem spalania. Wynika to z faktu, że strumień gazów spalinywych jest w tym przypadku najwyższy, a zatem straty ciepła (które są mniej więcej stałe co do strumienia) mają relatywnie najmniejsze znaczenie.

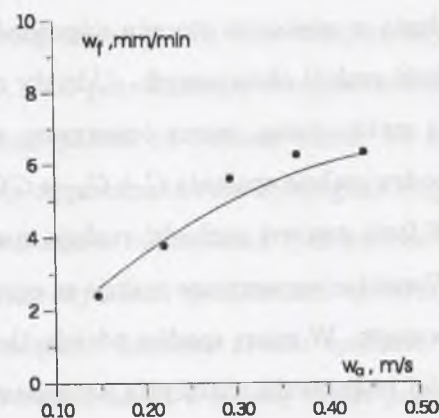




Rys.9.3. Porównanie obliczonej i zmierzonej struktury obszaru spalania dla prędkości napływu powietrza  $w_a = 0,36\text{m/s}$

Fig.9.3. Comparison of calculated (solid line) and measured (points) combustion zone structure for the air velocity  $w_a = 0,36\text{m/s}$

Rysunki 9.1-9.3 świadczą o poprawności stworzonego modelu matematycznego. Uzyskano bardzo dobrą zgodność zarówno jakościową, jak i ilościową składu gazu oraz temperatury fazy stałej. Podobnie dobrą zgodność zaobserwować można na rys.9.4, na którym przedstawiono obliczoną i zmierzona prędkość propagacji frontu spalania jako funkcję prędkości napływu powietrza. Rozbieżności w najgorszym przypadku wynoszą około 10%, co jest wartością bardzo satysfakcjonującą. Nieco gorsza jest jakościowa zgodność wyników, gdyż punkty pomiarowe wykazują nieco bardziej stromy przebieg funkcji  $w_f = f(w_a)$  w zakresie niższych wartości  $w_a$  oraz nieco łagodniejszy przebieg tej funkcji w zakresie wyższych wartości tego parametru.



Rys.9.4. Porównanie obliczonej i zmierzonej zależności prędkości spalania od prędkości napływu powietrza

Fig.9.4. Comparison of calculated and measured reaction front velocity as a function of air velocity

Dobra zgodność wyników obliczeń i pomiarów pozwala na prowadzenie analizy zjawisk zachodzących w złożu w oparciu o obliczenia numeryczne. Model umożliwia, między innymi, przeprowadzenie analizy wrażliwości, która jest praktycznie niemożliwa w badaniach eksperymentalnych. Ponadto obliczenia wolne są od przypadkowych błędów pomiarowych, które niejednokrotnie znacznie utrudniają analizę wyników.

## 9.2. Struktura obszaru spalania

Na rys.9.1-9.3 obserwuje się podobne tendencje w przebiegu krzywych. Zaobserwować można minimalne, ale jednak wyraźne przesunięcie między miejscem, w którym zaczyna rosnąć temperatura, a miejscem początku zmian udziałów składników w gazie. Innymi słowy wzrost temperatury 'wyprzedza' zmiany składu gazu. Świadczy to o tym, że paliwo nagrzewa się głównie dzięki przepływowi ciepła w fazie stałej, a nie poprzez konwekcyjny przepływ ciepła z fazy gazowej. Można zatem przypuszczać, że za prędkość przemiesz-

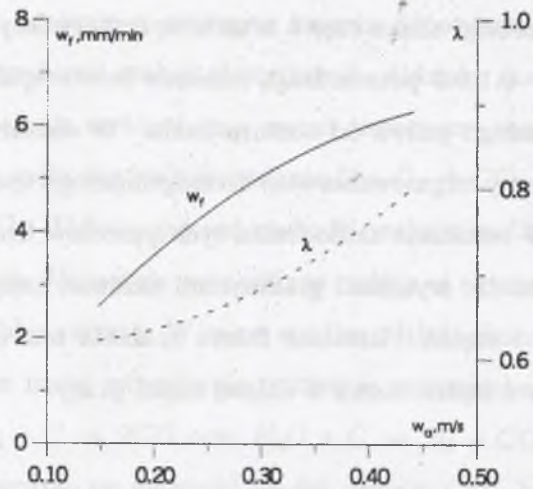
czania się frontu spalania w większym stopniu odpowiada przepływ ciepła, a w mniejszym szybkość reakcji chemicznych. Udziały zarówno  $CO_2$ , jak i  $CO$  w strefie spalania szybko rosną, czemu towarzyszy spadek stężenia  $O_2$ . W obszarze tym zachodzą reakcje spalania  $C + O_2 \rightarrow CO_2$  oraz półspalania  $2C + O_2 \rightarrow 2CO$ . W fazie gazowej zachodzi reakcja spalania tlenku węgla oraz części lotnych. Wszystkie wspomniane reakcje są egzotermiczne, dlatego temperatura szybko wzrasta. W miarę spadku udziału tlenu reakcje spalania przebiegają coraz mniej intensywnie, nabierają natomiast znaczenia reakcje zgazowania  $CO_2 + C \rightarrow 2CO$  oraz  $H_2O + C \rightarrow H_2 + CO$ . W efekcie ich zachodzenia obserwuje się niewielki spadek udziału  $CO_2$ , któremu towarzyszy wyraźniejszy wzrost udziału  $CO$ , jako że na jeden kmol  $CO_2$  w reakcji zgazowania przypadają 2 kmol  $CO$ . Reakcje zgazowania są endotermiczne, co prowadzi do obniżenia temperatury w obszarze ich zachodzenia. Skład gazu za strefą spalania zmienia się powoli, ale nie wykazuje, na analizowanej długości złoża, tendencji do stabilizowania się. Przeprowadzone obliczenia równowagi chemicznej wskazują, że za frontem spalania skład odbiega od stanu równowagowego, a mimo to stężenia substancji zmieniają się bardzo nieznacznie. Przyczyną tego stanu rzeczy jest fakt, że reakcja zgazowania charakteryzuje się dość wysoką energią aktywacji i nie zachodzi zbyt intensywnie, pomimo dość wysokiej temperatury. Różnice między przebiegami krzywych udziałów poszczególnych składników oraz temperatur we wszystkich trzech przedstawionych przypadkach są niewielkie. Można zaobserwować jedynie nieznaczne zwiększanie grubości frontu spalania wraz ze wzrostem prędkości napływu powietrza. Przyczyną tego, że różnice są tak niewielkie, jest to, że wzrost prędkości gazu powoduje wzrost strumienia gazu, który musi przereagować we froncie spalania, ale równocześnie przyczynia się do wzrostu współczynników wymiany masy, co przyspiesza zachodzenie reakcji.

Obliczone przebiegi zmian stężeń oraz temperatury fazy gazowej przedstawione na rys. 9.1-9.3 potwierdzają istnienie frontu spalania, który oddziela obszar świeżego paliwa od obszaru żużła. W obszarze frontu spalania zachodzą procesy odgazowania oraz heterogenicznego spalania substancji palnej paliwa. W rezultacie zachodzenia tych procesów front spalania charakteryzuje się bardzo wysokimi gradientami zarówno temperatury (rzędu stu K/mm), jak i stężeń. Istnienie frontu spalania ma ważne implikacje praktyczne, o czym będzie mowa w dalszej części pracy.

### 9.3. Prędkość spalania

Wykorzystując stworzony program komputerowy przeprowadzono obliczenia wpływu prędkości napływu powietrza na wartość prędkości propagacji frontu spalania. Jednocześnie wykorzystując równanie (7.3) obliczono stosunek nadmiaru powietrza we froncie spalania. Rezultat przedstawiony jest na rys.9.5. Prędkość spalania rośnie wraz ze wzrostem prędkości napływu powietrza, co można wyjaśnić rosnącym współczynnikiem wymiany masy, który decyduje o prędkości całego procesu. Stosunek nadmiaru powietrza we froncie spalania, zgodnie z zależnością (7.3), wynika z prędkości napływu powietrza oraz prędkości propagacji frontu spalania. Zaobserwować można, że stosunek nadmiaru powietrza jest mniejszy od jedności, jednak rośnie wraz ze wzrostem prędkości napływu powietrza.

Obliczenia przeprowadzono w zakresie technicznie stosowanych prędkości napływu powietrza. Powyżej badanego zakresu następuje wydmuchiwanie ze złoża drobniejszych frakcji paliwa. Z tego względu należy wnioskować, że w praktyce spalania węgla stosunek nadmiaru powietrza we froncie spalania jest mniejszy od jedności, a zatem nie cała substancja palna paliwa ulega spaleniu we froncie. Implikuje to konieczność podziału powietrza na pierwotne i



Rys.9.5. Prędkość propagacji frontu spalania oraz stosunek nadmiaru powietrza jako funkcje prędkości napływu powietrza

Fig.9.5. Reaction front velocity and air excess ratio as a functions of combustion air velocity

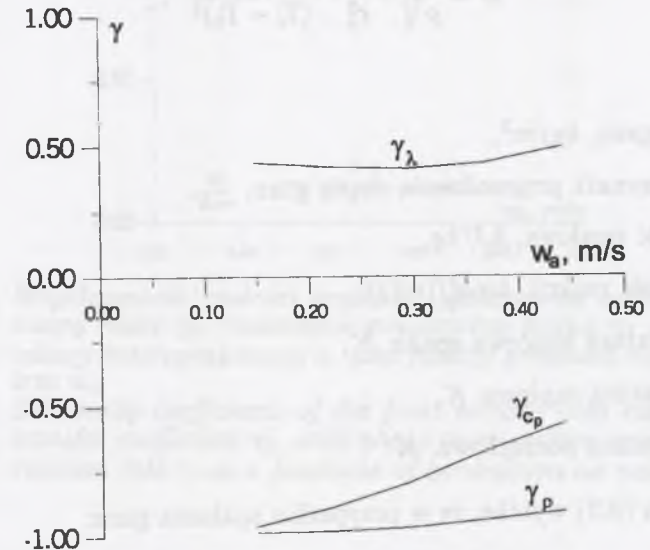
wtórne. W kotłach z rusztem przesuwym podział dokonywany jest wzdłuż rusztu, podczas gdy w kotłach z rusztem retortowym powietrze wtórne doprowadzane jest ponad front spalania.

#### 9.4. Analiza wrażliwości

Przedstawione do tej pory wyniki wskazują na dobrą zgodność obliczeń oraz pomiarów laboratoryjnych zarówno co do poziomu wartości, jak i tendencji. Pozwala to na wykorzystanie modelu matematycznego do zbadania charakteru zależności prędkości spalania od podstawowych parametrów paliwa oraz procesu. Do tego celu wykorzystano opisaną poprzednio analizę wrażliwości. Dla danej prędkości napływu powietrza współczynnik wrażliwości  $\gamma_{\vartheta_i}$  prędkości spalania  $w_f$  na  $i$ -ty parametr procesu lub paliwa  $\vartheta_i$  obliczyć można jako:

$$\gamma_{\vartheta_i} = \frac{\vartheta_i}{w_f} \frac{\partial w_f}{\partial \vartheta_i} \quad (9.1)$$

Zarówno ten, jak i wszystkie inne współczynnik wrażliwości obliczono przy użyciu opracowanego kodu komputerowego. Zgodnie z przedstawionymi uprzednio rozważaniami na podstawie obliczonego współczynnika wrażliwości  $\gamma_{\vartheta_i}$  można wnioskować, że w otoczeniu rozwiązania  $w_f \sim \vartheta_i^{\gamma_{\vartheta_i}}$ .



Rys.9.6. Współczynniki czułości prędkości spalania na współczynnik przewodzenia ciepła fazy stałej  $\gamma_\lambda$ , gęstość fazy stałej  $\gamma_\rho$  oraz ciepło właściwe fazy stałej  $\gamma_{cp}$  jako funkcje prędkości napływu powietrza  $w_a$

Fig.9.6 Sensitivity coefficient of reaction front velocity with respect to solid phase conductivity  $\gamma_\lambda$ , solid phase density  $\gamma_\rho$  and solid phase heat capacity  $\gamma_{cp}$  as a functions of combustion air velocity  $w_a$

Rysunek 9.6 przedstawia zależność współczynnika czułości prędkości spalania paliwa na współczynnik przewodzenia ciepła paliwa  $\gamma_\lambda$ , gęstość  $\gamma_\rho$  oraz właściwą pojemność cieplną  $\gamma_{cp}$ . Współczynniki przedstawiono jako funkcję prędkości napływu powietrza  $w_a$ . Z rys.9.6 wynika, że współczynnik  $\gamma_\lambda \approx 0.5$ ,  $\gamma_\rho \approx -1$ , natomiast współczynnik  $\gamma_{cp}$  przybiera wartości z przedziału  $(-1, 0; -0, 5)$ . Wynika z tego, że:

$$w_f \sim \lambda^{0.5} \rho^{-1} c_p^{-0.5} \quad (9.2)$$

W [4] przeprowadzona jest analiza propagacji frontu spalania w jednorodnej mieszance gazowej, w wyniku której autor otrzymał następującą zależność opisującą normalną prędkość spalania gazu:

$$w = \frac{1}{\rho} \sqrt{\frac{2\lambda_g W_d}{c_p^2} \frac{\int_{T_i}^{T_f} \dot{\omega} dt}{(T_i - T_0)^2}}, \quad (9.3)$$

gdzie:

$\rho$  - gęstość gazu,  $kg/m^3$ ,

$\lambda_g$  - współczynnik przewodzenia ciepła gazu,  $\frac{W}{mK}$ .

$W_d$  - wartość opałowa,  $kJ/kg$ ,

$\dot{\omega}$  - wydajność reakcji,  $kmol/(m^3s)$

$T_f$  - temperatura końcowa spalin,  $K$ ,

$T_i$  - temperatura zapłonu,  $K$ ,

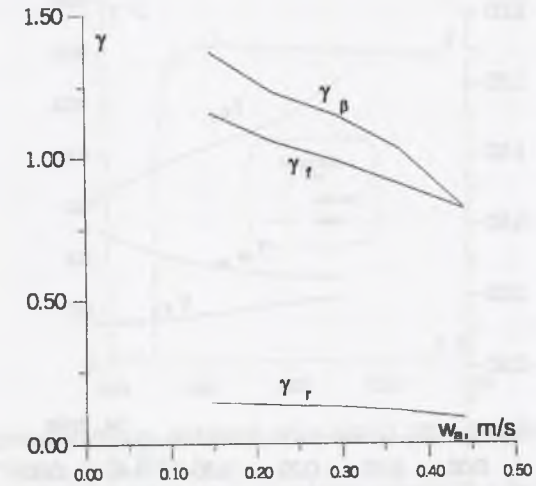
$T_0$  - temperatura początkowa,  $K$ .

Ze wzoru (9.3) wynika, że w przypadku spalania gazu:

$$w \sim \lambda_g^{0.5} \rho^{-1} c_p^{-1} \quad (9.4)$$

Zależności (9.4) oraz (9.2) są niemal identyczne. Można na tej podstawie stwierdzić, że podobnie jak w przypadku gazu o szybkości rozprzestrzeniania się frontu spalania decydują procesy przepływu ciepła. Jediną rozbieżność w stosunku do (9.4) obserwuje się przy wyższych strumieniach powietrza, gdy współczynnik  $\gamma_{cp}$  rośnie do -0,5. Rozbieżność ta wynika z tego, że wraz ze wzrostem strumienia powietrza zwiększa się jego chłodzące działanie na początkową strefę spalania, w której zachodzi proces nagrzewania paliwa. W efekcie coraz większa część energii przekazywanej od frontu spalania do świeżej mieszanki zużywana jest na podgrzanie powietrza a nie paliwa.

Rysunek 9.7 obrazuje wpływ prędkości napływu powietrza na współczynniki czułości prędkości spalania względem współczynnika wymiany masy  $\gamma_\beta$ ,

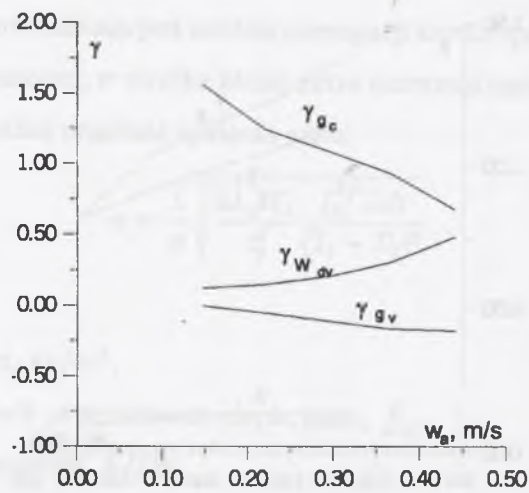


Rys.9.7. Współczynniki czułości prędkości spalania na współczynnik wymiany masy  $\gamma_\beta$ , rozwinięcie powierzchni paliwa  $\gamma_f$  oraz szybkość reakcji heterogenicznych  $\gamma_r$  jako funkcje prędkości napływu powietrza  $w_a$

Fig.9.7. Sensitivity coefficients of the front velocity with respect to mass transfer coefficient  $\gamma_\beta$ , solid phase cross section perimeter  $\gamma_f$  and reaction rate  $\gamma_r$  as a functions of combustion air velocity  $w_a$

obwodu zwilżanego paliwa  $\gamma_f$  oraz szybkości reakcji heterogenicznej  $\gamma_r$ . Zauważyć można, że  $\gamma_\beta \gg \gamma_r$ , co świadczy, że proces spalania kontrolowany jest przez zjawisko dyfuzji a nie kinetyki chemicznej. Zgadza się to z wnioskami z analizy liczby Semenowa przedstawionymi w [34]. Mały wpływ szybkości reakcji, zależnej silnie od temperatury, pozwala żywić nadzieję, że możliwe będzie przedstawienie prędkości spalania paliwa stałego w postaci wzorów kryterialnych bardzo dogodnych do użycia w praktyce przemysłowej. Gdyby proces kontrolowany był przez kinetykę chemiczną, temperatura fazy stałej byłaby zdecydowanie wyższa, co mogłoby prowadzić do topnienia popiołu i tym samym zwiększenia straty chemicznej w produktach stałych.

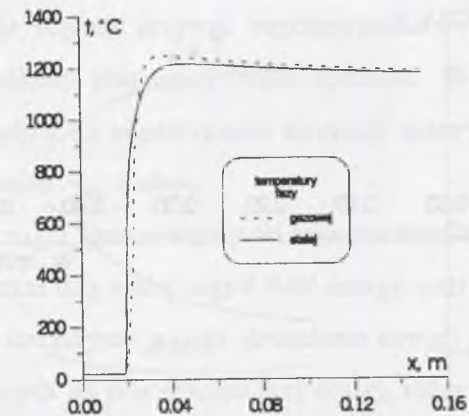
Na rys.9.8 przedstawiono z kolei zależność współczynników wrażliwości prędkości spalania względem zawartości pierwiastka węgla  $\gamma_{gc}$ , wartości opałowej części lotnych  $\gamma_{w_{av}}$  oraz zawartości części lotnych  $\gamma_{gv}$ . Pewnym zasko-



Rys.9.8. Współczynniki czułości prędkości spalania względem zawartości pierwiastka węgla  $\gamma_{gc}$ , zawartości części lotnych  $\gamma_{gv}$  oraz wartości opałowej części lotnych  $\gamma_{wdv}$  jako funkcje prędkości napływu powietrza  $w_a$

Fig.9.8. Sensitivity coefficients of reaction front velocity with respect to carbon gramm fraction  $\gamma_{gc}$ , volatile matter contents  $\gamma_{gv}$  and calorific value of volatile matter  $\gamma_{wdv}$  as a functions of combustion air velocity  $w_a$

czaniem jest fakt, że prędkość spalania słabo zależy od zawartości i wartości opałowej części lotnych, o czym świadczy niewielka wartość współczynników  $\gamma_{wdv}$  oraz  $\gamma_{gv}$ . Zdaniem autora wynika to z faktu, że części lotne wydzielają się z paliwa do fazy gazowej i przemieszczają się wraz z masą gazu w kierunku obszaru o wyższej temperaturze. Ich spalanie następuje dopiero po okresie opóźnienia chemicznego zapłonu, a zatem efekt cieplny reakcji ujawnia się w obszarze i tak już wysokiej temperatury, nie przyczynia się więc do istotnego wzrostu strumienia ciepła przekazywanego od strefy frontu spalania do świeżego paliwa. Na rys.9.9 przedstawiono obliczone profile temperatury fazy gazowej oraz stałej. Zauważyć można, że faza gazowa ulega nagrzewaniu kosztem fazy stałej, dopiero w obszarze wyższych temperatur ujawnia się efekt energetyczny reakcji homogenicznych w masie gazu, w efekcie których



Rys.9.9. Temperatury fazy gazowej oraz stałej przy prędkości napływu powietrza  $w_a = 0,22 \text{ m/s}$

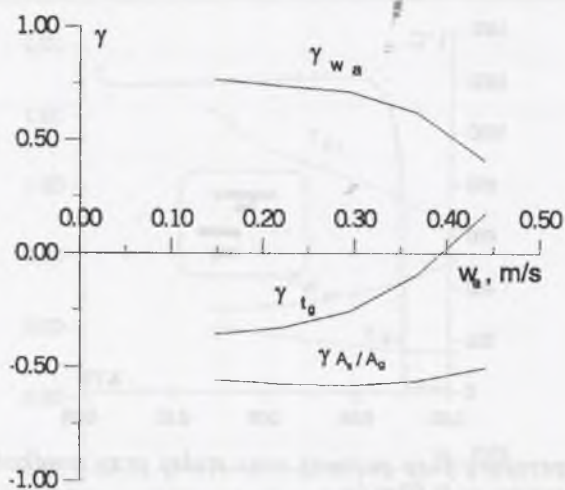
Fig.9.9. Gas and solid phase temperatures along the bed for air velocity  $w_a = 0,22 \text{ m/s}$

temperatura fazy gazowej zaczyna przewyższać temperaturę fazy stałej. Za frontem spalania temperatura fazy stałej jest wciąż niższa od temperatury fazy gazowej, co wynika z endotermiczności reakcji zgazowania, która chłodzi fazę stałą.

Współczynniki czułości prędkości spalania względem prędkości początkowej gazu  $\gamma_{wa}$ , temperatury początkowej gazu  $\gamma_{tg}$  oraz stosunku powierzchni przekroju fazy stałej do gazowej  $\gamma_{A_s/A_g}$  przedstawiono na rys.9.10. Niska wartość współczynnika  $\gamma_{tg}$  świadczy o stosunkowo niewielkim wpływie temperatury początkowej gazu na prędkość spalania. W przypadku gazu zależność prędkości spalania od temperatury początkowej określona jest zgodnie z (9.3) równaniem:

$$w_s \sim \frac{1}{T_i - T_0} \quad (9.5)$$

Z zależności tej wynika, że prędkość spalania rośnie gwałtownie w przypadku  $T_0 \rightarrow T_i$  osiągając wartość nieskończoną dla  $T_i = T_0$ , co odpowiada wybuchowi mieszanki gazowej. W analizowanym przypadku spalania paliwa



Rys.9.10. Współczynniki czułości prędkości spalania względem prędkości napływu powietrza ciepła  $\gamma_{w_a}$ , temperatury powietrza  $\gamma_{t_g}$ , oraz stosunku powierzchni fazy stałej do gazowej  $\gamma_{A_s/A_g}$  jako funkcje prędkości napływu powietrza  $w_a$ .

Fig.9.10 Sensitivity coefficients of reaction front velocity with respect to air velocity  $\gamma_{w_a}$ , air temperature  $\gamma_{t_g}$  and solid to gas phase cross section areas ratio  $\gamma_{A_s/A_g}$  as a functions of air velocity  $w_a$ .

stałego temperatura początkowa gazu  $T_g$  jest odległa od temperatury zapłonu  $T_i$ , a zatem stosunkowo słabo wpływa na wartość prędkości. Wniosek ten ma istotne znaczenie praktyczne, gdyż w większych kotłach z rusztem mechanicznym powietrze do spalania jest najczęściej podgrzewane, a słaba zależność  $w_f = f(T_g)$  w zakresie  $T_g \ll T_i$  pozwala na przyjęcie z dobrym przybliżeniem, że prędkość spalania w powietrzu zimnym jest równa prędkości spalania w powietrzu gorącym. Obliczony współczynnik  $\gamma_{t_g}$  jest mniejszy od zera w przeważającej części badanego przedziału, co oznacza, że wzrost temperatury powietrza powoduje spadek prędkości spalania. Wynika to ze spadku koncentracji tlenu wyrażonej w  $kmol/m^3$  i będącej siłą napędową reakcji heterogenicznych.

Charakter zależności  $\gamma_{w_g} = f(w_a)$  wynika z wpływu, jaki prędkość powietrza ma na współczynnik wymiany masy  $\beta$ . Początkowo wzrost prędkości

powietrza powoduje większy przyrost współczynnika wymiany masy, a tym samym wzrost prędkości propagacji frontu spalania. W obszarze wyższych prędkości  $w_a$  jej wpływ na współczynnik wymiany masy jest mniejszy i stąd wartość współczynnika  $\gamma_{w_g}$  maleje.

Współczynnik  $\gamma_{A_s/A_g}$  jest mniejszy od zera, co wynika z faktu, że wraz ze wzrostem powierzchni fazy stałej rośnie ilość energii potrzebnej do nagrzania paliwa, czemu nie towarzyszy wzrost strumienia energii wyzwolanej w reakcjach heterogenicznych na powierzchni fazy stałej, który jest proporcjonalny do obwodu zwilżanego.

Chcąc rozpatrywać wpływ wielkości ziaren węgla na szybkość spalania należy wziąć pod uwagę wartości współczynników  $\gamma_{A_s/A_g}$  oraz  $\gamma_f$ , gdyż wraz ze spadkiem średniej średnicy ziaren węgla zmienia się wartość zarówno  $\frac{A_s}{A_g}$ , jak i  $f$  (rys.9.6 oraz 9.10). Ponieważ  $|\gamma_f| > |\gamma_{A_s/A_g}|$ , zatem należy wnioskować, że spadek ziarnistości węgla prowadzić będzie do zwiększenia stopnia rozwinięcia powierzchni węgla i tym samym jego obwodu zwilżanego, co w konsekwencji powinno prowadzić do zwiększenia prędkości propagacji frontu spalania.

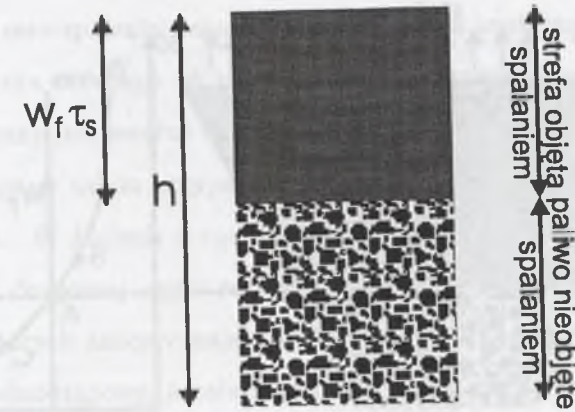
## 10. Podstawowe wnioski praktyczne

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, które pozwoliły na lepsze poznanie zjawisk zachodzących podczas spalania paliwa stałego w warstwie nieruchomej. Wyniki badań numerycznych pozwoliły z kolei na uogólnienie natury tych zjawisk.

W efekcie dotychczasowych rozważań sformułować można szereg wniosków o charakterze zarówno poznawczym, jak i użytkowym. Część z tych wniosków stosowana jest w praktyce, jednak dzięki tej pracy uzyskuje pełniejsze uzasadnienie teoretyczne. Ponadto wyniki pracy stwarzają możliwość ujęcia ilościowego procesu spalania w złożu stałym.

Istotne jest spostrzeżenie, że współprądowemu spalaniu paliwa w złożu stałym towarzyszy powstanie frontu spalania, który rozprzestrzenia się ze stałą prędkością w kierunku przeciwnym do kierunku napływu powietrza. Front ten ma grubość rzędu kilku milimetrów i charakteryzuje się występowaniem wysokich gradientów zarówno temperatury, jak i stężeń. Jak wykazały obliczenia numeryczne, prędkość rozprzestrzeniania się frontu spalania zależy głównie od procesu przepływu ciepła. Od frontu spalania o wysokiej temperaturze następuje przepływ ciepła w kierunku zimnego paliwa. W efekcie paliwo nagrzewa się, co prowadzi do wydzielenia części lotnych oraz zainicjowania reakcji heterogenicznych spalania na powierzchni fazy stałej. W wyniku tych procesów temperatura rośnie, a front spalania przemieszcza się w kierunku przepływu ciepła.

W kotłach z rusztem przesuwym czas pobytu paliwa w kotle oraz czas spalania paliwa zależą od prędkości przemieszczania się rusztu. W pewnych przypadkach czas ten  $\tau_s$  może być mniejszy niż czas potrzebny na pokonanie przez front spalania całej wysokości warstwy paliwa  $\frac{h}{w_f}$ . W takiej sytuacji stałe produkty spalania zawierają zarówno częściowo spalone, jak i zupełnie

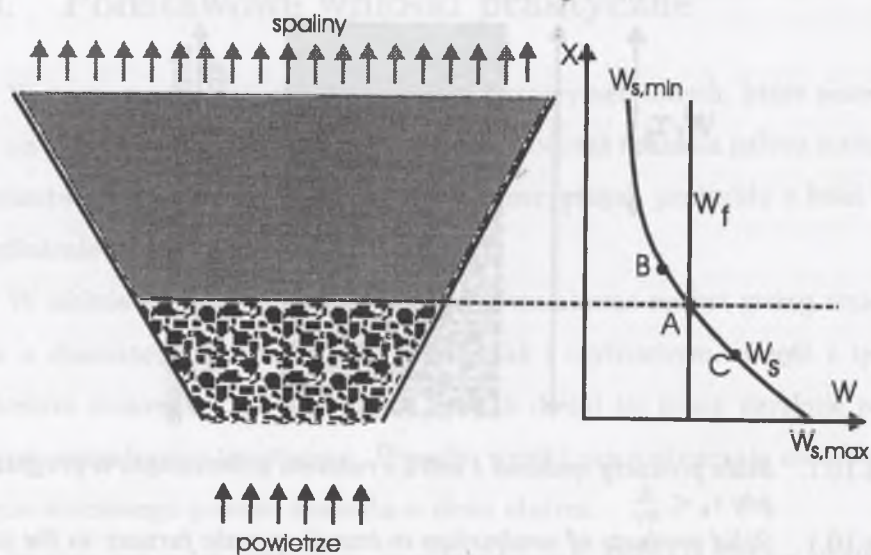


Rys.10.1. Stałe produkty spalania z kotła z rusztem przesuwym w przypadku gdy  $\tau_s < \frac{h}{w_f}$

Fig.10.1. Solid products of combustion in traveling grate furnace in the case when  $\tau_s < \frac{h}{w_f}$

nie nauruszone paliwo, co obrazuje rys.10.1. Określenie straty chemicznej w produktach stałych wymaga w tym przypadku pomiaru wartości opałowej, a nie jedynie zawartości części palnych, co jest najczęściej stosowaną praktyką.

W kotłach z rusztem retortowym istnienie frontu spalania w znacznym stopniu upraszcza ich konstrukcję, gdyż przy odpowiednim doborze parametrów eksploatacyjnych podajnik paliwa kontaktuje się wyłącznie z paliwem o niskiej temperaturze. Na bazie prędkości spalania wyjaśnić można również mechanizm stabilizacji położenia frontu spalania w kotłach z rusztem retortowym. Na rys.10.2 przedstawiono wykres zmian prędkości przemieszczania się paliwa  $w_s$  oraz prędkości przemieszczania się frontu spalania  $w_f$  wzdłuż wysokości złoża. Prędkość  $w_s$  maleje wraz ze wzrostem przekroju poprzecznego rusztu, natomiast prędkość  $w_f$  jest stała dla danej prędkości napływu powietrza. Stabilizacja położenia frontu występuje w punkcie A, w którym  $w_f = w_s$ . Jest to punkt równowagi stabilnej, gdyż w przypadku gdy front przemieści się do punktu C, prędkość fazy stałej przewyższy prędkość frontu



Rys.10.2. Mechanizm stabilizacji położenia frontu spalania w kotle z rusztem retortowym

Fig.10.2. Flame front stabilization mechanism in underfeed boiler

spalania, w efekcie czego front zostaje przesunięty na powrót do punktu A. Podobnie, gdy front przesunie się do punktu B, prędkość propagacji frontu przewyższa prędkość fazy stałej, w efekcie czego front przemieszcza się w kierunku punktu A. W rzeczywistości sprawa stabilizacji położenia frontu spalania jest bardziej zawiła niż to przedstawia rys.10.2, gdyż wraz ze zmianą przekroju rusztu zmienia się nie tylko prędkość fazy stałej, ale również prędkość fazy gazowej, a w efekcie prędkość propagacji frontu spalania. Z tego względu znajomość zależności  $w_f = f(w_a)$  jest bardzo pomocna w procesie dobierania kształtu rusztu retortowego.

W pracy wykazano, że w przypadku niektórych paliw, do których należał węgiel z KWK "Rozbark", nie cała substancja palna ulega spalaniu we froncie. W efekcie spalanie paliwa musi być zorganizowane dwuetapowo, co wiąże się z podziałem powietrza spalania na pierwotne oraz wtórne. Powietrze pierwotne doprowadzane jest w pierwszym etapie spalania, w którym występuje front

spalania. W celu spalania pozostałej części paliwa konieczne jest doprowadzenie powietrza wtórnego. W kotłach z rusztem przesuwным podział powietrza dokonywany jest wzdłuż długości rusztu. Znajomość prędkości spalania paliwa pomaga w takim przypadku w rozdziale powietrza na poszczególne strefy rusztu. W kotłach z rusztem retortowym powietrze wtórne doprowadzane jest do górnej części rusztu, ponad strefę spalania. Niektóre inne paliwa, do których zaliczyć należy badane w ramach pracy wióry drzewne, spalają się jednoetapowo, a cała substancja palna ulega spalaniu we froncie spalania.

Istotne praktyczne znaczenie ma wprowadzone pojęcie krzywej wypalania pierwiastka węgla. Krzywa umożliwia obliczenie straty chemicznej w produktach stałych w zależności od parametrów konstrukcyjnych oraz eksploatacyjnych kotła. Ułatwia to proces projektowania palenisk, a w szczególności dobór długości rusztu oraz organizację doprowadzenia powietrza spalania. Z drugiej strony krzywa wypalania znajduje zastosowanie w procesie sterowania kotłami, pozwalając na ograniczenie zużycia paliwa oraz substancji szkodliwych.



## 11. Przykład wykorzystania wyników - sterowanie kotłem rusztowym

Ostatecznym celem prowadzonych badań numerycznych czy eksperymentalnych jest wykorzystanie ich wyników w warunkach przemysłowych. W tej części pracy przedstawiono możliwości zastosowania osiągniętych wyników do sterowania kotłem z przesuwym rusztem mechanicznym. Niezbędne badania przemysłowe przeprowadzono w jednej elektrociepłowni centralnej Polski [65]. Na podstawie analizy wyników badań zaproponowano algorytm sterowania kotłem rusztowym, którego celem jest minimalizacja zużycia paliwa. W tego typu kotłach emisja większości substancji szkodliwych jest w przybliżeniu proporcjonalna do zużycia paliwa. Zatem ograniczenie zużycia paliwa prowadzi jednocześnie do zmniejszenia ekologicznej uciążliwości kotłów.

Opracowany algorytm umożliwił poprawę sprawności kotła o 5 punktów procentowych podczas prób ręcznego sterowania kotłem według wyników obliczeń modelu. Niestety, algorytm nie doczekał się wdrożenia do układu automatyki wspomnianej elektrociepłowni, co wynikało ze zmiany polityki modernizacyjnej władz elektrociepłowni. W następnych rozdziałach opisano problemy sterowania kotłami rusztowymi oraz zarys algorytmu sterowania kotłem.

### 11.1. Problemy sterowania kotłami rusztowymi

Niska sprawność kotłów rusztowych wynika z niewłaściwego doboru parametrów eksploatacyjnych, wynikającego z niedostatecznego poznania procesów spalania paliw stałych na ruszcie. Taki stan rzeczy w połączeniu z wielką liczbą kotłów rusztowych pracujących w Polsce [17] powoduje znaczne zwiększenie zużycia paliwa w skali kraju, przyczyniając się jednocześnie do

pogorszenia stanu środowiska naturalnego. W praktyce stosowane są następujące metody sterowania kotłami z rusztem mechanicznym:

- Metoda 'na oko' polega na doborze prędkości posuwu rusztu w zależności od wymaganej wydajności cieplnej oraz doborze strumienia powietrza tak, by strefa spalania rozciągała się na 2/3 długości rusztu. W metodzie tej sprawność średnioroczna rzadko kiedy przekracza 60%, a mimo to stosowana jest jeszcze dość powszechnie, szczególnie w kotłowniach zakładowych. Metodę tę zalecają do tej pory niektóre podręczniki. W przypadku braku aparatury kontrolno-pomiarowej jest to jedyna możliwa do zastosowania metoda. Niestety, nadal wiele zakładów przemysłowych wykorzystuje kotły rusztowe nie stosując żadnych przyrządów pomiarowych.
- Metoda 'według składu spalin' polega na doborze prędkości posuwu rusztu w zależności od wymaganej wydajności cieplnej oraz na doborze strumienia powietrza tak, by stężenie  $O_2$  lub  $CO_2$  zawierało się w określonych granicach. Metoda ta jest powszechnie stosowana i uważana za najlepszą z możliwych. Tymczasem przyczynia się ona jedynie do nieznacznej poprawy sprawności w stosunku do metody 'na oko'. Sprawność osiągnięta dzięki zastosowaniu sterowania według składu spalin wynosi około 70%. Tak nieznaczne podniesienie sprawności wynika ze stosunkowo małej wrażliwości składu spalin na ilość powietrza podmuchowego [39] oraz z faktu, że optymalny skład spalin jest różny dla różnych obciążeń cieplnych, co uwzględniane jest jedynie sporadycznie. Jest to cecha odróżniająca kotły rusztowe od kotłów na paliwa płynne czy kotłów pyłowych. Dodatkowym zakłóceniem tej metody jest dość znaczny błąd pomiarowy analizatorów cyrkonowych tlenu, które są powszechnie stosowane do analizy składu spalin kotłowych.

- Metoda 'maksymalizacji sprawności' [42] opracowana została w wyniku niedoskonałości dwóch poprzednich metod. Polega ona na potraktowaniu kotła jako obiektu sterowania bez wnikania w istotę procesu spalania. Ilość powietrza spalania dobierana jest w niej eksperymentalnie, dzięki czemu możliwe jest określenie maksimum sprawności dla danego obciążenia cieplnego. Sprawności osiągane dzięki tej metodzie wahają się wokół 80%, jednak metoda ta jest dobra w przypadku pracy kotła z niezmiennym obciążeniem w dłuższych odcinkach czasu, co ogranicza jej przydatność do wielu zastosowań.

W tej pracy autor przedstawił nową metodę sterowania kotłem, która wykorzystuje wyniki przeprowadzonych w poprzednich rozdziałach rozważań i pozwala na pracę kotła z możliwie wysoką sprawnością również w przypadku, w którym obciążenie kotła często ulega zmianom [49].

## 11.2. Opis kotła i przeprowadzonych badań

Badania przemysłowe przeprowadzono na kotle OR-32 w elektrociepłowni zlokalizowanej w centralnej Polsce. Ich celem było zweryfikowanie przemysłowe wniosków z badań laboratoryjnych.

**Opis kotła.** Badania przeprowadzono na kotle parowym OR-32 o następujących danych podawanych przez producenta:

Dane podstawowe

wydajność maksymalna trwała	32 t/h
temperatura pary świeżej	500 °C
ciśnienie pary świeżej	6,9 MPa
sprawność gwarantowana	80 %

Paliwo (węgiel kamienny)

klasa	50/12 do 50/20
-------	----------------

sortyment	MI MII
zawartość wilgoci	<20 %
zawartość części lotnych w masie palnej	35 %
wartość opałowa	21 MJ/kg
Ruszt mechaniczny, łuskowy	
długość	7000 mm
szerokość	2 x 2500 mm
powierzchnia	35 m <sup>2</sup>

Gwarantowana sprawność kotła może być osiągnięta w przypadku pracy kotła przy niezmiennym obciążeniu i w praktyce jest ona znacznie wyższa niż osiągnięta faktycznie.

**Wielkości mierzone.** Pomiarów energetycznych kotła dokonywano w stanie ustalonym. Pomiarami objęto następujące wielkości:

- strumień powietrza,  $m^3/h$ ,
- gęstość nasypowa,  $kg/m^3$
- skład elementarny węgla,
- wartość opałowa węgla,  $kJ/kg$
- zawartość tlenu w spalinach,
- zawartość węgla w żużlu,
- strumienie wody oraz pary,  $kg/s$ ,
- temperatura spalin, °C,
- temperatura wody, °C,
- temperatura pary, °C,
- prędkość przesuwu rusztu,  $m/s$ ,

- wysokość warstwowicy,  $m$ ,
- ciśnienie pary,  $Pa$ .

Pomiary prowadzono przy różnych wysokościach warstwowicy oraz prędkościach przesuwu rusztu.

**Równania bilansu substancji i masy.** W celu obliczenia podstawowych strat energii oraz sprawności kotła sformułowano następujące równania bilansowe kotła:

- bilans pierwiastka węgla

$$\dot{P} \frac{c}{12} = \dot{n}_{ss} ([CO_2] + [CO]) + \frac{\dot{G}_p c_p}{12} + \frac{\dot{G}_z c_z}{12} \quad (11.1)$$

- bilans wolnego tlenu

$$\dot{P} \left( \frac{o}{32} - \frac{h}{4} \right) + 0.21 \dot{n}_a = \dot{n}_{ss} ([CO_2] + [SO_2] + [O_2] + \frac{1}{2}[CO]) \quad (11.2)$$

- bilans wodoru

$$\dot{P} \left( \frac{h}{2} + \frac{w}{18} \right) + \dot{n}_a X_z = \dot{n}_{H_2O} \quad (11.3)$$

- bilans azotu

$$\dot{P} \frac{n}{28} + 0.79 \dot{n}_a = \dot{n}_{ss} [N_2] \quad (11.4)$$

- bilans palnej siarki

$$\dot{P} \frac{s}{32} = \dot{n}_{ss} [SO_2] \quad (11.5)$$

- równanie tworzenia żużla

$$\dot{P} p a_1 = \dot{G}_z (1 - c_z) \quad (11.6)$$

- równanie tworzenia pyłu lotnego

$$\dot{P} p a_2 = \dot{G}_p (1 - c_p) \quad (11.7)$$

- warunek kompletności składu spalin

$$[CO] + [CO_2] + [SO_2] + [N_2] + [O_2] = 1 \quad (11.8)$$

- równanie bilansu energii

$$\begin{aligned} \dot{P} W_d + \dot{G}_w c_w t_w = \dot{G}_{par} i_{par} + \\ \dot{n}_{ss} ( \sum [i] (M i)_i + [CO] (M W_d)_{CO} ) + \\ \dot{n}_{H_2O} (M i)_{H_2O} + ( \dot{G}_z c_z + \dot{G}_p c_p ) W_{d,C} + \dot{Q}_{ot} \end{aligned} \quad (11.9)$$

W przedstawionych równaniach zastosowano następujące oznaczenia:

$\dot{P}$  - strumień zużycia paliwa w kotle,  $kg/s$ ,

$c, s, h, o, n, w, p$  - udziały gramowe węgla, siarki, wodoru, tlenu, azotu, wilgoci oraz popiołu w paliwie,

$\dot{n}_a$  - strumień doprowadzanego powietrza,  $kmol/s$ ,

$\dot{n}_{ss}$  - strumień spalin suchych,  $kmol/s$ ,

$[i]$  - udziały składników spalin suchych,

$\dot{n}_{H_2O}$  - strumień wilgoci w spalinach,  $kmol/s$ ,

$\dot{G}_p$  - strumień pyłu w spalinach,  $kg/s$ ,

$\dot{G}_z$  - strumień żużla,  $kg/s$ ,

$c_p, c_z$  - udział gramowy pierwiastka węgla w żużlu oraz pyłe,

$a_1, a_2$  - współczynniki tworzenia żużla oraz pyłu,

$\dot{G}_w$  - strumień wody zasilającej kocioł,  $kg/s$ ,

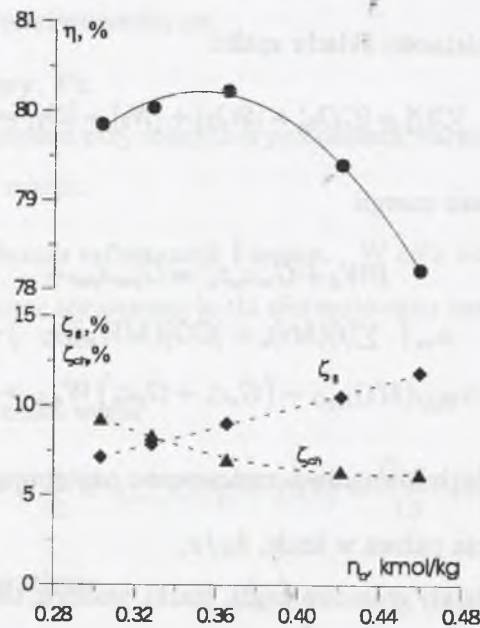
$\dot{G}_{par}$  - strumień pary świeżej,  $kg/s$ ,

$W_d, W_{d,C}$  - wartość opałowa paliwa oraz wartość opałowa pierwiastka węgla,  $kJ/kg$ ,

$X_z$  - molowy stopień zawilżenia powietrza,  $kmol/kmol$ ,

$c_w$  - ciepło właściwe wody,  $kJ/(kgK)$ ,

$i_{par}$  - entalpia pary świeżej,  $kJ/kg$ ,



Rys.11.1. Zależność sprawności kotła  $\eta$ , straty chemicznej w żużlu  $\zeta_{ch}$  oraz straty fizycznej w spalinach  $\zeta_f$  kotła OR-32 jako funkcje jednostkowej ilości powietrza. Wysokość warstwy paliwa 140 mm, prędkość rusztu 8,2 m/h

Fig.11.1. Thermal efficiency  $\eta$ , chemical loss in slag  $\zeta_{ch}$  and physical loss in flue gases  $\zeta_f$  for the OR-32 steam boiler as a functions of relative air amount. Fuel layer height 1400mm, grate velocity 8,2 m/h

$(Mi)_i$  - przyrost entalpii i-tego składnika od temperatury otoczenia do temperatury spalin, kJ/kmol.

Przedstawione równania poddano procedurze uzgadniania [46]. Na podstawie wyliczonych wielkości określono stratę chemiczną w żużlu, stratę fizyczną w spalinach oraz sprawność. Przykładowe wyniki przedstawia rys.11.1. Na rysunku tym podstawowe straty energii oraz sprawność przedstawione są w funkcji jednostkowej ilości powietrza spalania wyrażonej w kmol/kg. Zauważyć można, że w przypadku zbyt małej ilości powietrza spalania rośnie strata chemiczna w żużlu, w efekcie czego maleje sprawność. W przypadku zbyt dużej ilości powietrza spalania rośnie z kolei strata fizyczna w spalinach

rzutując ujemnie na sprawność. Na przedstawionym rysunku optymalna jednostkowa ilość powietrza wynosi około 0,36 kmol/kg.

W trakcie badań stwierdzono, że optymalna wartość jednostkowej ilości powietrza nie jest wielkością stałą i zależy od prędkości przemieszczania się rusztu oraz od wysokości warstwy paliwa. Dodatkowo na wielkość optymalnej ilości powietrza spalania wpływ ma stan czystości powierzchni grzewczych. W przypadku znacznego zanieczyszczenia powierzchni grzewczych wzrasta temperatura spalin, a tym samym strata fizyczna w spalinach. W takim przypadku korzystne może być zmniejszenie ilości powietrza, pomimo że pociąga to za sobą wzrost straty chemicznej w produktach stałych. Utrzymywanie stałej wartości stosunku nadmiaru powietrza lub stałej jednostkowej ilości powietrza spalania nie jest zatem równoznaczne z maksymalizacją sprawności kotła. Pomiary kotła przeprowadzono dla różnych prędkości przesuwu rusztu, różnych wysokości warstw paliwa i różnych ilości powietrza. Opracowane wyniki posłużyły jako baza do budowy i weryfikacji algorytmu sterowania.

### 11.3. Zarys opracowanego algorytmu

Podstawowe parametry pracy kotła rusztowego to: wysokość warstwy paliwa, szybkość przemieszczania się rusztu oraz ilość powietrza. Parametry te decydują zarówno o mocy osiągananej przez kocioł, jak i o jego sprawności. Przez optymalizację pracy rozumie się taki dobór tych parametrów, który zapewnia najwyższą sprawność przy określonej mocy. Cechą charakterystyczną kotłów rusztowych odróżniającą je od kotłów na paliwa płynne bądź kotłów pyłowych i znacznie utrudniającą proces sterowania są bardzo długie stałe czasowe, rzędu godziny.

Sprawność kotła obliczana może być metodą bezpośrednią lub pośrednią. W metodzie bezpośredniej obliczany jest strumień energii chemicznej paliwa oraz strumień ciepła użytecznego. Sprawność obliczona metodą bezpośrednią nie zawiera informacji o przyczynach strat energii, a tym samym nie umożliwia ich ograniczenia. W metodzie pośredniej obliczane są straty energii, a ich suma odejmowana jest od 100%. Dzięki znajomości strat można podjąć działania zmierzające do ich zmniejszenia, a tym samym do zwiększenia sprawności. Niestety, do wyznaczenia straty chemicznej w żużlu, będącej jedną z podstawowych strat energii, konieczna jest znajomość zawartości części palnych w żużlu, co wymaga długotrwałej procedury laboratoryjnej lub stosowania bardzo kosztownej aparatury pomiarowej. Dodatkowo sprawność w obu metodach obliczona może być dopiero po osiągnięciu przez kocioł stanu ustalonego. Innymi słowy w momencie konieczności zmiany mocy kotła nieznana jest wartość sprawności, która zostanie osiągnięta, a tym samym nie wiadomo, czy będzie ona najwyższa z możliwych. W praktyce te ograniczenia powodują, że obie metody obliczania sprawności znajdują zastosowanie jedynie w diagnozowaniu pracy kotła, a nie w procesie jego sterowania.

Autor niniejszej pracy postawił sobie za cel stworzenie algorytmu wolnego od przedstawionych wad. Algorytm został stworzony pod kątem zastosowania go w sterownikach kotłowych, co wymusiło znaczne jego uproszczenie i rezygnację ze skomplikowanych i czasochłonnych metod numerycznych. Osia algorytmu jest zastosowanie prostego modelu pracy kotła i wykorzystanie wprowadzonego pojęcia krzywej wypalania paliwa do obliczenia straty chemicznej w żużlu [50], [52], [53], [54], [55], [56].

Jak już wspomniano, sprawność w metodzie pośredniej wyznaczana jest poprzez uprzednie określenie strat energii i odjęcie ich sumy od 100%, co

można zapisać jako:

$$\eta = 1 - \sum \zeta_i, \quad (11.10)$$

przy czym  $\zeta_i$  oznacza i-tą stratę energii. Spośród wszystkich strat energii decydujące znaczenie mają straty chemiczne w żużlu ( $\zeta_{ch}$ ), fizyczne w spalinach ( $\zeta_f$ ) oraz ciepła do otoczenia ( $\zeta_{ot}$ ), czyli:

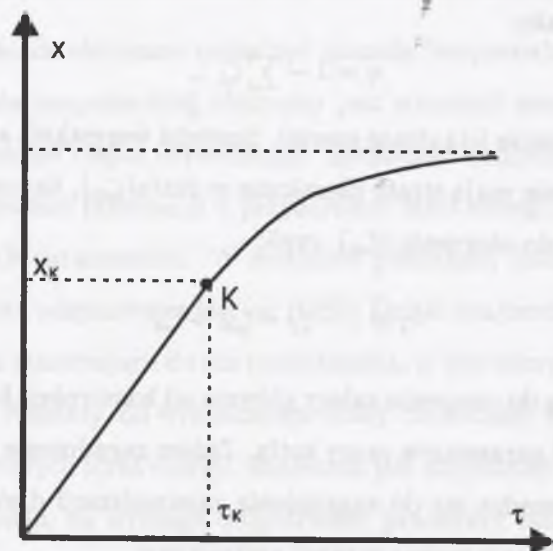
$$\eta \approx 1 - \zeta_f - \zeta_{ch} - \zeta_{ot} \quad (11.11)$$

Strata ciepła do otoczenia zależy głównie od konstrukcji kotła i praktycznie nie zależy od parametrów pracy kotła. Zatem zagadnienie maksymalizacji sprawności sprowadza się do zagadnienia minimalizacji dwóch pozostałych strat, co symbolicznie można zapisać następująco:

$$\zeta_f + \zeta_{ch} \Rightarrow MIN \quad (11.12)$$

Do minimalizacji wyrażenia (11.12) konieczna jest znajomość sposobu, w jaki zależą one od parametrów pracy kotła. Poniżej opisano sposób wyznaczenia obu tych strat, zastosowany przez autora tej pracy.

**Strata chemiczna w żużlu.** Zmiana zawartości pierwiastka węgla w paliwie charakteryzowana jest przez wprowadzoną we wcześniejszych rozdziałach krzywą wypalania przedstawioną na rys.11.2. Krzywa ta składa się z dwóch części. Pierwsza z nich, będąca linią prostą, odpowiada propagacji frontu spalania w paliwie, a druga objętościowemu spalaniu pozostałości po pierwszym etapie. Części te łączą się w punkcie K, którego odcięta  $\tau_K$  odpowiada momentowi, w którym front spalania dociera do dolnej krawędzi złoża, gdzie zanika. Rzędna punktu K określa stopień wypalania pierwiastka węgla we froncie spalania. W pierwszym etapie spalania w paliwie występują dwie strefy - nad frontem spalania znajduje się częściowo spalone paliwo zawierające pierwiastek węgiel w ilości  $x_k$ , podczas gdy poniżej frontu znajduje

Rys.11.2. Zależność stopnia wypalenia  $x$  od czasu  $\tau$ Fig.11.2. Carbon burn-out fraction  $x$  as a function of time  $\tau$ 

się świeże paliwo. W chwili  $\tau < \tau_K$  front spalania znajduje się w odległości  $w\tau$  od górnej krawędzi złoża. Energia chemiczna paliwa nad frontem na jednostkę powierzchni podstawy wynosi:

$$\rho w \tau (1 - x_K) c W_{d,C} \quad (11.13)$$

a w paliwie poniżej frontu:

$$\rho (h - w\tau) W_d \quad (11.14)$$

Sumarycznie więc strata chemiczna odniesiona do początkowej energii chemicznej wynosi:

$$\zeta_{ch} = \frac{\rho w \tau (1 - x_K) c W_{d,C} + \rho (h - w\tau) W_d}{\rho h W_d} \quad (11.15)$$

co po uproszczeniu zapisać można następująco:

$$\zeta_{ch} = \frac{w\tau(1 - x_K)c W_{d,C}}{h W_d} + \frac{h - w\tau}{h} \quad (11.16)$$

Począwszy od czasu  $\tau_K$  spalanie zachodzi w całej objętości złoża. Krzywa wypalania w tym obszarze aproksymowana została funkcją o następującej postaci:

$$x = 1 - (1 - x_K) \exp \left[ -\frac{\tau - \tau_K}{C} \right] \quad (11.17)$$

Postać funkcji (11.17) nie ma niestety podstaw teoretycznych i należy ją traktować jedynie jako aproksymację wyznaczonego doświadczalnie przebiegu krzywej. Strata chemiczna w żużlu dla  $\tau > \tau_K$  wynosi:

$$\zeta_{ch} = \frac{(1 - x) c W_{d,C}}{W_d} \quad (11.18)$$

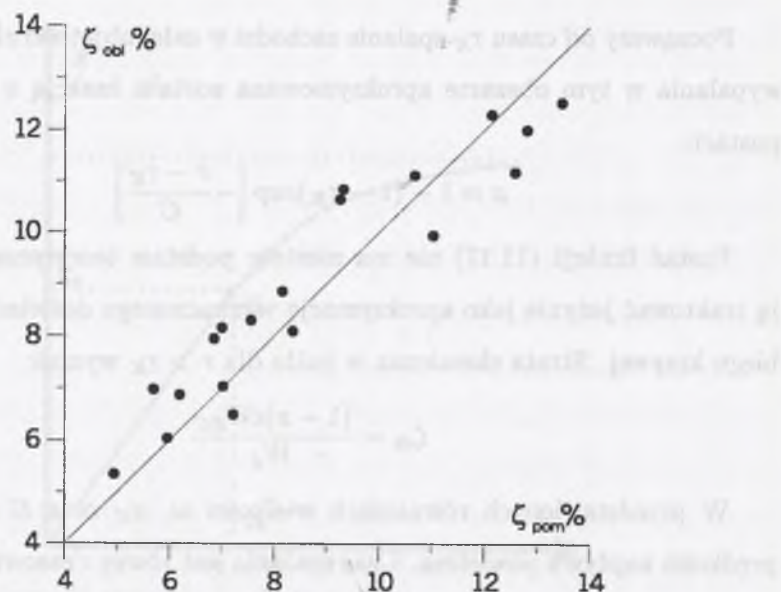
W przedstawionych równaniach wielkości  $w$ ,  $x_K$  oraz  $C$  są funkcjami prędkości napływu powietrza. Czas spalania jest równy czasowi przebywania paliwa w kotle, czyli:

$$\tau = \frac{L}{w_r} \quad (11.19)$$

przy czym  $L$  oznacza czynną długość rusztu, a  $w_r$  prędkość rusztu.

Według przedstawionego schematu obliczono stratę chemiczną w żużlu dla różnych stanów pracy kotła i porównano ją ze stratą chemiczną obliczoną w procedurze uzgadniania na podstawie pomiarów kotła rzeczywistego. Wynik porównania przedstawiony jest na rys.11.3. Na rysunku tym wprowadzono prostą  $\zeta_{ch,obl} = \zeta_{ch,pom}$ , wokół której skupiać powinny się punkty. Zauważyć można, że punkty te w istocie leżą dość blisko prostej, a odstępstwa są rzędu jednego punktu procentowego straty chemicznej. Mimo znacznych uproszczeń przyjętych przy wyznaczaniu straty chemicznej w żużlu otrzymany wynik należy uznać za bardzo satysfakcjonujący.

**Strata fizyczna w spalinach.** Znajac wartość straty chemicznej w żużlu określić można zawartość węgla w żużlu, a następnie, wykorzystując równania bilansu substancji oraz pomiar koncentracji  $O_2$  lub  $CO_2$  w spalinach, wyznaczyć jednostkowe ilości poszczególnych składników spalin  $n_i'$  po-

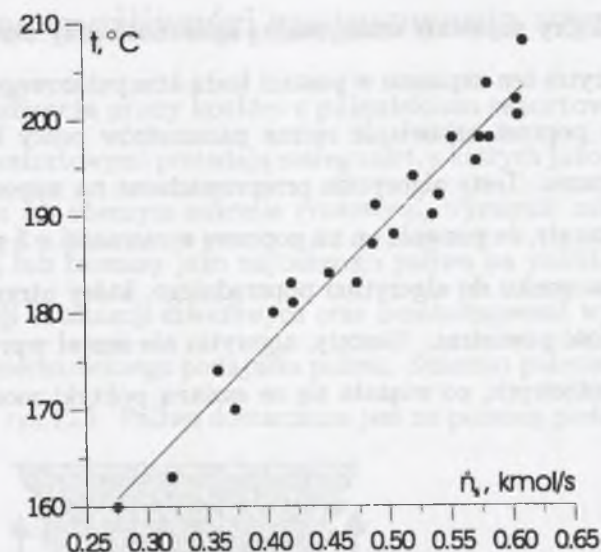


Rys.11.3. Zależność straty chemicznej obliczonej  $\zeta_{ch,obl}$  oraz zmierzonej  $\zeta_{ch,pom}$ . Przedstawiona prosta odpowiada  $\zeta_{ch,obl} = \zeta_{ch,pom}$   
 Fig.11.3. Calculated  $\zeta_{ch,obl}$  versus measured  $\zeta_{ch,pom}$  chemical loss in slag. Line illustrates  $\zeta_{ch,obl} = \zeta_{ch,pom}$

wstałych ze spalania 1 kg paliwa. Do obliczenia straty fizycznej w spalinach określonej wzorem

$$\zeta_f = \frac{\sum n_i^r (Mi)_i}{W_d} \quad (11.20)$$

potrzebna jest jeszcze znajomość temperatury występującej w przyroście entalpii  $(Mi)_i$ . W trakcie badań autor stwierdził, że temperatura ta zależy liniowo od strumienia spalin  $\dot{n}_s$  powstających w kotle. Zależność ta, określona na podstawie przeprowadzonych pomiarów przemysłowych, przedstawiona jest na rys.11.4. Z rysunku tego widać, że w istocie odstępstwa od zależności liniowej są niewielkie. Należy jednak podkreślić, że nachylenie prostej zależy od stopnia czystości powierzchni grzewczych kotła i nie jest stałe w czasie pracy kotła.



Rys.11.4. Zależność zmierzonej temperatury spalin od całkowitej ilości spalin. Obydwie wielkości obliczone w procedurze uzgadniania  
 Fig.11.4. Measured flue gas temperature as a function of flue gas flow rate. Both values obtained in the adjustment procedure

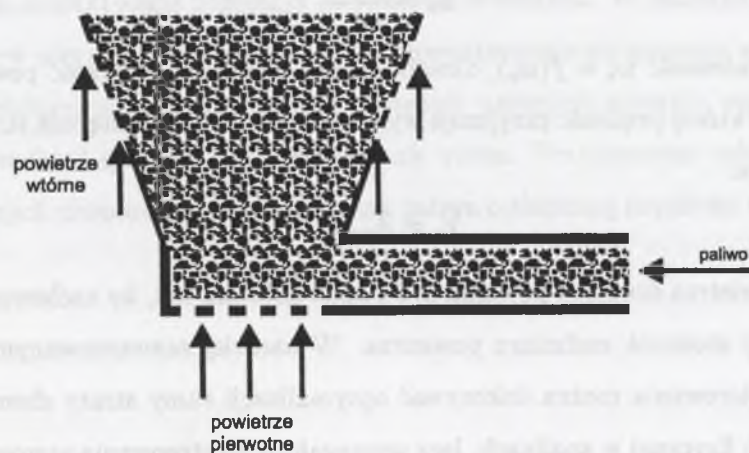
Przedstawiony sposób pozwala na określenie wartości strat na przykład drogą obliczeń wariantowych i wyboru tego zestawu parametrów pracy kotła, który zapewnia maksymalną sprawność przy określonej mocy cieplnej kotła.

We wspomnianej elektrociepłowni praca kotła OR-32 charakteryzowała się dużymi zmianami obciążenia wynikającymi z pokrywania potrzeb technologicznych sąsiedniego zakładu. Szybkie zmiany obciążenia możliwe są do realizacji jedynie poprzez zmianę prędkości rusztu. Optymalizacja sprowadzała się więc do doboru ilości powietrza zapewniającej maksymalną możliwą sprawność. Opracowany algorytm opierał się na obliczeniach wariantowych i wyborze optymalnego strumienia powietrza. W momencie zmiany zapotrzebowania na ciepło algorytm wykonywał obliczenia sprawności dla kilku prędkości przesuwu rusztu oraz kilku strumieni powietrza. Obliczenia opierały się na zależnościach (11.12)-(11.20). Spośród przeliczonych wariantów wybie-

rany był ten, który zapewnia maksymalną sprawność przy określonej mocy cieplnej. Algorytm ten zapisano w postaci kodu komputerowego i testowano jego działanie poprzez ustawianie ręczne parametrów pracy kotła według wskazań programu. Testy algorytmu przeprowadzone na wspomnianym kotle OR-32 wykazały, że pozwala on na poprawę sprawności o 5 punktów procentowych w stosunku do algorytmu poprzedniego, który utrzymywał stałą jednostkową ilość powietrza. Niestety, algorytm nie został wprowadzony do sterowników kotłowych, co wiązało się ze zmianą polityki modernizacyjnej zarządu.

## 12. Inne możliwości zastosowania wyników

**Optymalizacja pracy kotłów z paleniskiem retortowym.** Kotły z paleniskami retortowymi posiadają szereg zalet, z których jako najważniejsze, decydujące o ich obecnym sukcesie rynkowym, wymienić należy: wykorzystanie węgla lub biomasy jako najtańszego paliwa na polskim rynku, niski poziom emisji substancji szkodliwych oraz bezobsługowość wynikającą z zastosowania mechanicznego podajnika paliwa. Schemat paleniska retortowego przedstawia rys.12.1. Paliwo dostarczane jest za pomocą podajnika ślimakowego



Rys.12.1. Schemat paleniska retortowego

Fig.12.1. Scheme of the under-feed furnace

wego do stożkowego rusztu, gdzie przemieszcza się ku górze w rosnącym przekroju, dzięki czemu jego prędkość spada. Front spalania stabilizuje się w przekroju, w którym prędkość przemieszczania się paliwa równa jest prędkości spalania. Powyżej frontu spalania doprowadzane jest powietrze drugie, mające za zadanie dopalić substancję palną paliwa, która nie uległa spalaniu we froncie. W chwili obecnej brak jest danych, w jaki sposób powinien następować rozdział powietrza na pierwsze i drugie w funkcji mocy kotła i rodzaju węgla [26].



Można przyjąć, że niezależnie od mocy kotła front spalania powinien stabilizować się w określonym przekroju uznanym za optymalny. Zbyt wysokie stabilizowanie się frontu sprawia, że spada czas pobytu węgla w strefie dopalania i w efekcie rośnie strata chemiczna w żużlu, natomiast zbyt niskie stabilizowanie się frontu zagraża mechanicznej konstrukcji ślimaka. Jeżeli przyjąć zatem, że przekrój, w którym stabilizuje się front, jest stały, równy  $A_{opt}$ , to prędkość spalania  $w_s$ , przy strumieniu węgla  $\dot{G}_{pal}$ , powinna wynikać z następującej zależności:

$$w_s = \frac{\dot{G}_{pal}}{\rho A_{opt}} \quad (12.1)$$

Znając zależność  $w_s = f(w_a)$ , określić można niezbędną prędkość powietrza  $w_a$ , przy której prędkość przyjmuje wymaganą wartość, a następnie strumień powietrza:

$$\dot{V}_a = A_{opt} w_a \quad (12.2)$$

Ilość powietrza drugiego powinna być z kolei dobrana tak, by zachowany był określony stosunek nadmiaru powietrza. W bardziej zaawansowanym algorytmie sterowania można dokonywać optymalizacji sumy straty chemicznej w żużlu i fizycznej w spalinach, lecz wymagałoby to stosowania sterowników o stopniu komplikacji nieuzasadnionym ekonomicznie dla tego typu kotłów.

**Charakteryzowanie paliw.** Dobór paliwa do kotłów rusztowych dokonywany jest najczęściej na podstawie Dokumentacji techniczno-ruchowej (DTR) kotła. Informacje w niej zawarte nie w pełni charakteryzują paliwo [23]. W efekcie sprawność kotła, w przypadku dwóch paliw o identycznych wskaźnikach wymaganych przez DTR, może się znacznie różnić. Co więcej, zdarza się, że paliwo spełniające wymagania dokumentacji w ogóle nie daje się spalić w kotle [26].

Z powyższych względów prędkość spalania węgla wyznaczona w ściśle określonych warunkach może się stać użytecznym wskaźnikiem jakości węgla, a szczególnie jego przydatności pod kątem spalania w kotłach rusztowych.

**Analiza możliwości współspalania paliw.** W praktyce spalania ostatnio dużo uwagi poświęca się współspalaniu biomasy oraz odpadów z węglem. Wprowadzone pojęcie prędkości spalania może posłużyć do opracowania metod oceny możliwości tworzenia mieszanek różnych paliw. Przykładowo, w przypadku mieszanki węgla i wiórów drzewnych, przy zbyt dużej zawartości drewna, cząstki węgla pozostają 'zawieszone' w wiórach. W takim przypadku najpierw ulega spalaniu drewno, które charakteryzuje się znacznie wyższymi prędkościami propagacji frontu, a następnie następuje spalanie węgla, którego prędkość spalania jest zdecydowanie niższa. Przypuszczać należy, że w dowolnych proporcjach mieszać można paliwa o zbliżonej prędkości spalania.

### 13. Podsumowanie

W pracy autor postawił sobie za cel przeprowadzenie badań eksperymentalnych oraz numerycznych, które umożliwiłyby lepsze zrozumienie zjawisk występujących podczas spalania paliw stałych w warstwie nieruchomej przy współprądowym przepływie powietrza i paliwa. W ramach pracy zrealizowano następujące zadania cząstkowe:

- opracowano koncepcję oraz zbudowano stanowisko eksperymentalne, które pozwala na badanie procesu spalania paliw stałych w warstwie nieruchomej, a w tym wyznaczenie przebiegu temperatur w złożu oraz struktury frontu spalania,
- przeprowadzono badania eksperymentalne spalania wybranych paliw stałych, ze szczególnym uwzględnieniem węgla,
- opracowano sposób interpretacji danych eksperymentalnych, pozwalający na określenie szybkości spalania paliwa, oraz krzywej wypalania, decydującej o wartości straty chemicznej w produktach stałych,
- opracowano model matematyczny spalania paliwa w warstwie nieruchomej, który charakteryzuje się otwartością algorytmu, pozwalającą na łatwe modyfikacje,
- opracowano efektywny sposób uzyskania rozwiązania równań modelu,
- zbudowano program komputerowy analizy procesu spalania w złożu nieruchomym, ujmujący równania modelu i sposób ich rozwiązania,
- przeprowadzono numeryczną analizę wrażliwości prędkości spalania paliwa na podstawowe parametry paliwa i procesu,
- wskazano możliwości zastosowania uzyskanych wyników, przy czym jedna z tych możliwości została przedstawiona w szczegółowy sposób.

Realizacja powyższych zadań pozwoliła na sformułowanie wniosków o znaczeniu poznawczym oraz aplikacyjnym. W trakcie badań stwierdzono, że współprądowemu spalaniu paliw stałych w warstwie towarzyszy powstanie frontu spalania, który rozprzestrzenia się ze stałą prędkością w kierunku przeciwnym w stosunku do kierunku przepływu powietrza. Front spalania charakteryzuje się wysoką intensywnością zachodzących procesów, czego odzwierciedleniem są wysokie gradienty temperatury oraz stężeń. Jak wykazano w badaniach eksperymentalnych, nie cała substancja palna paliwa ulega spalaniu we froncie spalania, co wymusza konieczność doprowadzenia powietrza do drugiej fazy spalania. W kotłach z paleniskiem retortowym ta druga faza realizowana jest w górnej części paleniska poprzez doprowadzenie powietrza wtórnego. W kotłach z rusztem mechanicznym druga faza realizowana jest w końcowej części rusztu. Występowanie frontu spalania wskazuje, że w przypadku zbyt krótkiego czasu spalania paliwa w kotle z rusztem mechanicznym w dolnej części warstwy paliwa występuje ono w stanie niezmienionym. Zatem do określenia sprawności kotła konieczne jest badanie wartości opałowej stałych pozostałości po spalaniu, a nie jedynie zawartości części palnych.

Na szybkość rozprzestrzeniania się frontu spalania w dominującej mierze ma wpływ proces dyfuzji tlenu między masą gazu a powierzchnią węgla oraz proces transportu ciepła w złożu. Szybkość spalania jest ważnym parametrem, który powinien rzutować na konstrukcję paleniska. Mimo pewnych wielu analogii prędkości spalania paliw stałych i gazowych istnieją też ważne różnice. W przypadku mieszanin gazowych prędkość spalania w danych warunkach jest funkcją jedynie rodzaju paliwa oraz stosunku nadmiaru powietrza. W przypadku paliw stałych na wartość tę wpływ mają ponadto uziarnienie paliwa oraz stopień jego ubicia. Prędkość spalania paliw stałych jest więc pojęciem mniej ogólnym niż prędkość spalania mieszanin gazowych.

Zarówno badania numeryczne jak i eksperymentalne wskazują, że na prędkość propagacji frontu spalania stosunkowo niewielki wpływ mają części lotne, które spalają się w obszarze wyższych temperatur, nie przyczyniając się istotnie do wzrostu strumienia ciepła przekazywanego od frontu spalania do zimnego paliwa. Nie oznacza to jednak, że zawartość części lotnych jest nieistotnym parametrem paliwa. Części lotne odgrywają bowiem podstawową rolę w procesie zapłonu paliwa i są jednym z podstawowych parametrów decydujących o doborze paliwa dla danego typu kotła.

Badania numeryczne wskazują, że wzrost temperatury powietrza wpływa stosunkowo mało na zwiększenie prędkości spalania paliwa, co wynika z faktu zmniejszania koncentracji tlenu będącego siłą napędową procesów reakcji heterogenicznych. Należy się jednak spodziewać, że wniosek ten jest słuszny jedynie w przypadku temperatur powietrza znacznie niższych od temperatury zapłonu paliwa, czego potwierdzeniem są wyniki przeprowadzonej analizy wrażliwości.

W pracy przedstawiono jednowymiarowy model matematyczny spalania paliwa w warstwie oraz zaproponowano sposób jego rozwiązania. Przedstawiony sposób rozwiązania stwarza możliwość łatwej modyfikacji stworzonego kodu komputerowego. Model pozwala na wyznaczenie struktury obszaru spalania, prędkości spalania paliwa w danych warunkach oraz współczynników czułości wybranych parametrów względem charakterystyki paliwa oraz spalania. Uzyskano dobrą zgodność wyników obliczeń z wynikami pomiarów zarówno co do wartości, jak i tendencji zmian.

Poza wnioskami o charakterze poznawczym niniejsza praca wniosła kilka spostrzeżeń, których zastosowanie w praktyce spalania przyczynić się może do poprawy sprawności kotłów rusztowych, ograniczając tym samym emisję substancji szkodliwych. Do osiągnięć tych zaliczyć należy:

1. Wprowadzenie pojęcia krzywej wypalania pierwiastka węgla w paliwie i podanie prostej metody eksperymentalnej jej wyznaczenia. Krzywa wypalania pierwiastka węgla służyć może do określania straty chemicznej w żużlu, a tym samym może być wykorzystana w procesie optymalizacji pracy kotłów rusztowych.
2. Wprowadzenie prędkości spalania paliwa oraz powiązanie jej ze stosunkiem nadmiaru powietrza we froncie. Znajomość prędkości spalania paliwa może być pomocne w procesie projektowania paleniska oraz jego eksploatacji. Znajomość stosunku nadmiaru powietrza we froncie pozwala na lepszy rozdział powietrza na pierwotne oraz wtórne.
3. Wskazanie na parametry w istotny sposób wpływające na przebieg procesu spalania może się przyczynić do lepszej oceny paliw pod kątem ich stosowania w określonym typie palenisk.

Szczególnym osiągnięciem pracy jest połączenie metody badań laboratoryjnych z badaniami numerycznymi oraz wykorzystanie wyników tych badań w praktyce przemysłowej. Badania laboratoryjne pozwoliły na lepsze poznanie charakteru zjawiska spalania paliw stałych w warstwie oraz dostarczyły danych do weryfikacji modelu matematycznego. Z kolei model matematyczny pozwolił, poprzez analizę wrażliwości, na uogólnienie wyników badań na inne paliwa. O ostatecznej przydatności przeprowadzonych tutaj badań świadczy fakt, że opracowana metoda sterowania kotłem rusztowym, wykorzystująca wyniki badań laboratoryjnych, pozwoliła na osiągnięcie kilkuprocentowej oszczędności paliwa w warunkach przemysłowych. Należy przy tym podkreślić, że przed zastosowaniem opracowanego algorytmu badany kocioł miał już wysoką sprawność, a zatem podniesienie jej o 5 punktów procentowych jest wynikiem bardzo satysfakcjonującym.

Jak wspomniano na wstępie, proces spalania paliw stałych w warstwie nieruchomej jest słabo poznany. Praca rzuca pewne nowe światło, niemniej jednak ze względów oczywistych nie wyczerpuje zagadnienia. Wnioski z pracy znajdują zastosowanie w procesie konstrukcji i eksploatacji kotłów rusztowych oraz retortowych. Ponadto znajdują zastosowanie w ocenie paliw pod kątem ich przydatności do spalania w tego typu jednostkach.

## Literatura

1. Bartok W., Sarofin A., Fossil Fuel Combustion, John Wiley, New York, 1991
2. Błasiak W., Barański J., Stąsiek J., Optymalizacja procesu spalania w kotłach rusztowych. Konferencja naukowo-techniczna "Spalanie węgla", Ustroń 1999
3. Brezinsky K., The Next Twenty Five Years of Combustion, Combustion Science and Technology, Vol.98, 1994
4. Chomiak J., Combustion - a study in theory, fact and application, Abacus Press, New York, 1990
5. Donghoon S., Sangmin C., The Combustion of Simulated Waste Particles in a Fixed Bed, Combustion and Flame, Vol 121, 2000
6. Eaton A., Smoot L., Hill S., Eatough C., Components, formulations, solutions, evaluation and application of comprehensive combustion models, Progress in Energy and Combustion Science, Vol.25, 1999
7. Gardiner W, Combustion Chemistry, Springer-Verlag, New York 1984
8. Ghani M., Radulovic P., Smoot D., An Improved model for fixed-bed coal combustion and gasification: sensitivity analysis and applications, Fuel, Vo. 75, 1996
9. Glaborg P., Miller J., Kee R., Kinetic Modeling and Sensivity Analysis of Nitrogen Oxide Formation in Well-Stirred Reactors, Combustion and Flame, No 65m 1986
10. Glasman I., Combustion, Academic Press, Orlando 1987

11. Glasman I., A look forward: the next 25 Years, Combustion Science and Technology, Vol. 98, 1994
12. Gort R., Brouwers J., Theoretical analysis of the prepropagation of a re-  
culation front in a packed bed, Combustion Science and Technology, Vol  
124, 2001
13. Graczyński A., Polski przemysł węglowy, Energetyka Nr 2, 1999
14. Griselin N., Bai ., Simulation of biomass combustion and pollutant emis-  
sion in a furnace, 28 International Symposium on Combustion, Edin-  
burgh, July 30-August 4, 2000
15. Hindmarsh A., Signum Newsletter, 15 No.14, 1980
16. Jarosiński J., Techniki czystego spalania, WNT, Warszawa 1996
17. Katalog polskich przedsiębiorstwo ciepłowniczych, Przedsiębiorstwo  
usługowo-produkcyjno-handlowe Aspol, 1996
18. Kee R., Grcar J., Smooke M., Miller J, A fortran program for modeling  
one dimensional premixed flames, Sand85-8240, 1985
19. Kee R., Rupley F., Miller J., The chemkin thermodynamic data base,  
Sandia Report, SAND87-8215, 1987
20. Kapitaniak A., Sztraube J., Budowa i obsługa kotłów rusztowych, WNT,  
Warszawa 1991
21. Knorre G., Ariefew K., Włoch A., Nachapetian E., Paliew I., Szejnert  
W., Teoriya Topocznych Procesow, Energija, Moskwa 1966
22. Kordylewski W., Spalanie i paliwa, Oficyna Wydawnicza Politechniki  
Wrocławskiej, Wrocław 1999

23. Kordylewski W. (red), Biuletyn Informacyjny Polskiego Komitetu Badań  
Płomienia, nr2, 1999
24. Kowalewicz A., Podstawy procesów spalania, WNT, Warszawa 2000
25. Kubica K., Raińczak J., Wilkosz K., Paliwa stałe i urządzenia grzewcze  
stosowane w ogrzewnictwie w aspekcie uregulowań ekologicznych, Kon-  
ferencja naukowo-techniczna "Spalanie węgla", Ustroń 1999
26. Kubica K., Wilk. R, Szłek A., Raińczak J., Badania przydatności węgla  
Cukrowni Strzyżów S.A. do spalania w kotłach rusztowych, Instytut Che-  
micznej Przeróbki Węgla - Politechnika Śląska, opracowanie wewnętrzne,  
1999
27. Kuo K., Principles of Combustion, John Wiley & Sons, New York, 1986
28. Kwiecień J., Wpływ jakości węgla na eksploatację kotłów typu WR oraz  
na emisję zanieczyszczeń, Konferencja naukowo-techniczna "Spalanie wę-  
gla", Ustroń 1999
29. Law C., Combustion Science and Technology: Accomplishments and  
Challenges, Combustion Science and Technology, Vol. 98, 1994
30. Lawn C., Principles of combustion engineering for boilers, Academic  
Press London 1987
31. Lewandowski W., Proekologiczne źródła energii odnawialnej, WNT,  
Warszawa 2001
32. Nadziakiewicz J., Spalanie stałych substancji odpadowych, Gnome, Ka-  
towice 2001

33. Orłowski P., Dobrzański W., Kotły parowe w energetyce przemysłowej, WNT, Warszawa 1991
34. Petela R., Paliwa i ich spalanie, cz II Spalanie, Skrypty Politechniki Śląskiej nr 1043, Gliwice 1982
35. Peters B., Classification of Combustion Regimes in a Packed Bed of Particles Based on the Relevant Time and Length Scales, Combustion and Flame, Vol 116, 1999
36. PN-72/M-34128, Kotły parowe, wymagania i badania odbiorcze
37. Postrzednik S., Ciepło odgazowania paliw stałych - metoda określania, podstawowe własności, Karbo-energochemia-Ekologia, Nr 9, 1994
38. Purvis M., Santos S., Combustion of a small underfeed stoker firing coal and biomass, 28 International Symposium on Combustion, Edinburgh 2000
39. Rusinowski H., Wilk R., Ziębik A., Szega M., Szlęk A., Widziszowski R., System optymalnego sterowania pracą kotłów rusztowych, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, Nr 9, 1998
40. Rusinowski H., Szega M., Szlęk A., Wilk R., Method of Choosing the Optimal Parameters of Solid Fuel Combustion in Stoker Boilers, ECOS, Tokyo, 1999
41. Siedlaczek J., Senyca K., Ekologiczne spalanie węgla w kotłach grzewczych typu EKO-C i EKO-CR, Konferencja naukowo-techniczna "Spalanie węgla", Ustroń 1999

42. Skoroszewski A., Szlęk A., Wilk R., Założenia i efekty modernizacji systemu ciepłowniczego PEC Legionowo, Nowoczesne Ciepłownictwo, Nr 5, 1999
43. Smoot L., Fundamentals of coal combustion, Elsevier, 1993
44. Smoot L., A decade of combustion research, Progress in Energy and Combustion Science, Vol.23, 1997
45. Strategia Rozwoju Energetyki Odnawialnej, Ministerstwo Ochrony Środowiska, Warszawa 2000
46. Analiza termodynamiczna i ekonomiczna w energetyce przemysłowej, WNT, Warszawa 1983
47. Szlęk A., Badania procesu spalania węgla w warstwie stałej, BW-447/RIE-6/2000
48. Szlęk A., Wilk R., Modelowanie procesu spalania węgla w złożu stałym, Gospodarka Paliwami i Energią, kwiecień 1996
49. Szlęk A., Wilk R., Koncepcja sterowania kotłem rusztowym za pomocą modelu matematycznego o zmiennej charakterystyce, Gospodarka Paliwami i Energią, Nr 5, 1997
50. Szlęk A., Charakterystyka spalania węgla jako podstawowy parametr rzutujący na sprawność kotła, Gospodarka Paliwami i Energią, Nr 6, 1997
51. Szlęk A., Wilk R., Perspektywy użytkowania kotłów rusztowych w Polsce, Nowoczesne Ciepłownictwo, nr 11, 1999

52. Szlęk A., Wilk R., Modernizacja kotłów rusztowych jako sposób na zmniejszenie zużycia paliwa i emisji toksycznych substancji, Nowoczesne Ciepłownictwo, 11-12, 1998
53. Szlęk A., Wilk R., Badania laboratoryjne czasu spalania węgla jako istotnego parametru eksploatacji kotłów rusztowych, VII Forum Ciepłowników, Międzyzdroje 1998
54. Szlęk A., Wilk R., Predykcyjne sterowanie pracą kotła rusztowego jako sposób minimalizacji zużycia paliwa, Konferencja Polskiego Komitetu Badań Płomieni "Spalanie węgla'99", Ustroń-Zawodzie 1999.
55. Szlęk A., Wilk R., Określenie sprawności kotła rusztowego w warunkach zmiennego obciążenia cieplnego. Diagnostyka Jakości Spalania, Ustroń, 1998
56. Szlęk A., Wilk R., Sposób wyznaczania charakterystyki spalania paliw stałych oraz sposób sterowania kotłem rusztowym, a zwłaszcza pracującym ze zmiennym obciążeniem cieplnym. Zastrzeżenie patentowe nr P330050, 1998
57. Szlęk A., Modelowanie procesu spalania paliwa stałego w kotle rusztowym jako sposób optymalizacji jego pracy, XVII Zjazd Termodynamików, Kraków 1999
58. Ściążko M., Węgiel kamienny-podstawowy surowiec dla energetyki, Konferencja naukowo-techniczna "Spalanie węgla", Ustroń 1999
59. Tomczek J., Spalanie węgla. Skrypty Politechniki Śląskiej, nr 1667, Gliwice 1992

60. Tomczek J., Zgazowanie węgla. Skrypty Politechniki Śląskiej nr 1551, Gliwice 1991
  61. Warantz J., Maas U., Dibble R., Combustion, Springer, Heidelberg 1996
  62. Weinberg F., Combustion Research for the 21 Century - Some Speculative Extrapolations, Combustion Science and Technology, Vol.98, 1994
  63. Williams F., The Next 25 Years of Combustion Theory, Combustion Science and Technology, Vol.98, 1994
  64. Williams A., Pourkashanian M., Jones J., Skorupska N., Combustion and Gasification of Coal, Taylor and Francis, Londyn, 2000
  65. Wilk R., Szlęk A., Odlanicki T., Badania efektywności energetycznej kotła OR-32, NB-154/RIE-6/98
  66. Założenia polityki energetycznej Polski do roku 2020, luty 2000
- Witryny www**
67. Energoinvest Rybnik, [www.energo-inwest.co.pl](http://www.energo-inwest.co.pl)
  68. Gizex, [www.gizex.com.pl](http://www.gizex.com.pl)
  69. Metachem, [www.metachem.com.pl](http://www.metachem.com.pl)
  70. Fabryka Węglowych, Pszczyna, [master.ak.net.pl/urzon](http://master.ak.net.pl/urzon)
  71. Sędziszowskie Fabryki Kotłów, [www.sefako.com.pl](http://www.sefako.com.pl)

## BADANIA PROCESU SPALANIA PALIW STAŁYCH W WARSTWIE NIERUCHOMEJ

### Streszczenie

Praca dotyczy spalania paliw stałych w warstwie nieruchomej z ograniczeniem się do przypadku, w którym kierunek przepływu powietrza jest zgodny z kierunkiem przepływu paliwa.

Pierwsza część pracy dotyczy badań eksperymentalnych prowadzonych na specjalnej konstrukcji komorze badawczej. Przedstawiono przykładowe, reprezentatywne wyniki przebiegu temperatur fazy stałej oraz składu fazy gazowej jako funkcji czasu spalania. Przedstawione wyniki wskazują, że spalanie węgla przebiega dwuetapowo. Wykazano, że w pierwszej fazie spalania następuje propagacja frontu spalania w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu powietrza. W czasie tej fazy procesy chemiczne zachodzą niemal wyłącznie w cienkiej warstwie paliwa, nazwanej frontem. Drugi etap to spalanie objętościowe, które występuje po zaniku frontu spalania. W pracy wprowadzono pojęcie krzywej wypalania pierwiastka węgla, mogącej znaleźć zastosowanie w praktyce przemysłowej.

W drugiej części pracy przedstawiono jednowymiarowy model matematyczny spalania, ujmujący wszystkie podstawowe zjawiska zachodzące w złożu rzeczywistym. Zaproponowano zestaw warunków brzegowych oraz sposób rozwiązania zagadnienia. uzyskano dobrą zgodność wyników obliczeń i pomiarów. Przeprowadzono analizę wrażliwości, która wykazała, że na szybkość rozprzestrzeniania się frontu spalania dominujący wpływ mają zjawiska transportu ciepła.

W trzeciej części pracy podano przykład przemysłowego wykorzystania wyników pracy do sterowania kotłem OR-32. Wskazano ponadto inne potencjalne obszary zastosowań wyników pracy.

## INVESTIGATIONS OF THE FIXED BED COMBUSTION OF SOLID FUELS

### Summary

In the present work investigations of the fixed bed combustion of solid fuels have been presented. Considerations have been limited to the case of the common directions of air and fuel flow.

In the first part of the work the experimental investigations conducted in the combustion chamber of unique construction have been described. Selected, representative results of the temperature and concentrations measurements as a function of combustion time have been presented. It has been pointed out that during coal combustion two phases can be distinguished. In the first phase reaction front propagates in the direction opposite to the air flow. Chemical reactions are concentrated in the thin layer which has been named reaction front. In the second phase combustion takes place in whole bed's volume. Carbon burn-out curve has been defined which may be very useful for the industrial practice.

In the second part of the work one dimensional mathematical model has been presented. Set of boundary conditions together with solution method have been proposed. Good agreement of the experimental and numerical results have been achieved. Sensitivity analysis has shown that heat transport phenomena mainly affect the front propagation process.

In the third part of the work one example of the industrial applications has been presented in details. Other possibilities of applications have been mentioned.



BIBLIOTEKA GŁÓWNA  
Politechniki Śląskiej

P. 3350/01/135

Druk: Drukarnia Gliwice, ul. Zwycięstwa 27, tel. 230 49 50